Daniel Mohammad Rosyid
Dony Setyawan

KEKUATAN STRUKTUR KAPAL

Rancang Bangun

Beban ~ Respon

Analisa Keandalan Struktur Kapal

23.82
DS

PRADNYA PARAMITA
Penerbit teknologi dan informasi

G32.82
Ros
K

KEKUATAN STRUKTUR KAPAL

PERPUSTAKAAN NASIONAL RI
TAHUN ANGGARAN 2007

UNDANG-UNDANG NOMOR 7 TAHUN 1987
Tentang
Hak Cipta

Pasal 44

(1) Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 100.000.000,00 (seratus juta rupiah).

(2) Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 50.000.000,00 (lima puluh juta rupiah).

KEKUATAN STRUKTUR KAPAL

Oleh

Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D.
dan
Ir. Dony Setyawan

Cetakan Pertama

PRADNYA PARAMITA
JAKARTA

311-461/BPP/H/2000
MILI...
Badan Perpustakaan
Propinsi Jawa Timur

Perpustakaan Nasional: katalog dalam terbitan (KDT)

Rosyid, Daniel Mohammad
Kekuatan struktur kapal / oleh Daniel Mohammad Rosyid dan Dony Setiawan. -- Cet. 1 --
Jakarta: Pradnya Paramita, 2000.
xi; 127 hlm; 23 cm.

Bibliografi : hlm. 127
ISBN 979-408-446-8

1. Teknik kapal I. Judul.
II. Setyawan, Dony.

KEKUATAN STRUKTUR KAPAL

Oleh : Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D. dan Ir. Dony Setyawan
© Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang
Diterbitkan oleh : PT Pradnya Paramita
Jalan Bunga 8-8A
Jakarta 13140
Cetakan Pertama : 2000
Setting-Layout : Karya Grafis Digital (KARISTA), Jakarta
Dicetak oleh : PT Pertja

KATA PENGANTAR

Buku ini merupakan upaya awal untuk menyediakan bahan rujukan perancangan struktur kapal bagi mahasiswa maupun insinyur yang bekerja erat dengan struktur kapal.

Kapal adalah sebuah sistem rekayasa bergerak buatan manusia yang terbesar. Kompleksitasnya sebagian besar disebabkan oleh tuntutan *self-supporting capabillity* di lingkungan laut yang tidak *readily habitable*. Perilaku respon struktur kapal terhadap beban lingkungannya belum sepenuhnya dapat dipahami. Walaupun kini sudah tersedia perangkat analisis struktural berbasis metoda elemen hingga (*finite element methods*), aturan-aturan rancangbangun struktur kapal sedikit banyak masih mengandung konservatisme yang cukup tinggi.

Motivasi pemanfaatan teknik-teknik analisis respon struktur yang lebih rasional diperkuat oleh tuntutan sebagian otoritas klasifikasi seperti Lloyd's Register, det Norske Veritas, dan Biro Klasifikasi Indonesia, serta para *ship owners* untuk melakukan pemeriksaan kekuatan dengan menggunakan teknik-teknik yang berpijak pada prinsip-prinsip mekanika yang pertama. Rancangbangun dengan menggunakan rumus-rumus tidak lagi cukup, di samping tidak berdaya bila menghadapi rancangbangun kapal yang tidak lazim.

Di samping itu, tuntutan rasionalitas proses rancangbangun mengantarkan kita pada pendekatan semi-probabilistik, bahkan pendekatan keandalan (*reliability*), karena pendekatan Angka Keamanan (*Safety Factor*) diangggap tidak lagi rasional walaupun terbukti memadai. Filosofi rancangbangun yang kini berkembang, terutama yang sudah dikembangkan di dunia teknik lepas pantai, adalah filosofi kondisi batas (*Limit State Design Philosophy*). Dalam filosofi ini, ketidakpastiaan fisik, statistik, dan model dapat diakomodasikan dengan lebih eksplisit dalam proses rancangbangun.

Sebagai edisi pertama, buku di tangan pembaca ini tentu banyak mengandung kelemahan. Oleh karena itu, pembaca yang budiman diundang untuk memberikan kritik dan saran bagi perbaikannya. Akhirnya, dengan bismillah buku ini telah dimulai penulisannya, kiranya penulis berdua dapat menutupnya dengan alhamdulillah.

Surabaya, Juni 1999
Daniel Mohammad Rosyid
Dony Setyawan

DAFTAR ISI

Kata Pengantar v

BAB 1. PENDAHULUAN 1
1.1 Umum 1
1.2 Fitrah Ketidakpastian pada Sistem Rekayasa Maritim 2
1.3 Moda Kegagalan pada Struktur Laut 3
1.4 Tata Letak, Keandalan dan Biaya 4

BAB 2. RANCANG BANGUN STRUKTUR KAPAL 5
2.1 Fitrah Struktur Kapal 5
2.2 Ukuran dan Kompleksitas Struktur Kapal 5
2.3 Fungsi Berganda Komponen-komponen Struktur Kapal ... 6
2.4 Moda-moda Kegagalan Struktur Kapal 7
2.5 Falsafah dan Prosedur Perancangan Struktur Kapal 8

BAB 3. KERANGKA DASAR KONSTRUKSI KAPAL, PEMILIHAN BAHAN DAN MATERIAL KAPAL 11
3.1 Pendahuluan 11
3.2 Sistem Konstruksi 12
3.2.1 Sistem Konstruksi Melintang 13
3.2.2 Sistem Konstruksi Memanjang 14
3.2.3 Sistem Konstruksi Kombinasi 14
3.3 Pemilihan Bahan Konstruksi Kapal 26
3.4 Persyaratan Utama Bahan Konstruksi Kapal 26
3.5 Material Pelat dan Profil 27

BAB 4. BEBAN PADA STRUKTUR KAPAL 29
4.1 Beban pada Struktur Kapal 29
4.2 Beban Statis pada Kapal Terapung Diam 30
4.3 Beban-beban Gelombang 34
4.4 Evaluasi Deterministik Beban Gelombang 35
4.5 Taksiran Probabilistik Atas Beban Gelombang 36

BAB 5. ANALISA RESPON STRUKTUR KAPAL 39
5.1 Fitrah Reaksi-reaksi Struktural Kapal 39
5.2 Tegangan Langsung Primer 41
5.3 Perhitungan Modulus Penampang 43
5.4 Shear lag dan Lebar Efektif 45
5.5 Momen Lengkung Lateral dan Pengaruh Torsional 46

5.6 Respon-respon Struktur Sekunder 47
5.7 Respon-respon Struktur Tertier 52
5.8 Buckling Elastis Pelat Berpenegar 55
5.9 Respon Getaran Akibat Beban-beban Dinamis 56
5.10 Kerusakan Kelelahan Kumulatif 57
5.11 Superposisi Tegangan-tegangan 58
5.12 Kekuatan Melintang Struktur Kapal 58
5.13 Bangunan Atas 60
5.14 Konsentrasi Tegangan 60

BAB 6. PERHITUNGAN KEKUATAN MEMANJANG KAPAL .. 63
6.1 Pendahuluan 63
6.2 Menghitung Kekuatan Memanjang dengan Menggunakan BKI Volume II 1996 65
6.2.1 Bending Momen Gelombang 65
6.2.2 Bending Momen Tambahan Karena Beban Slamming pada Bagian Depan Kapal 67
6.2.3 Beban Momen Air Tenang 67
6.2.4 Tegangan yang Diizinkan 68
6.3. Menghitung Kekuatan Memanjang dengan Metode Berat Per Bagian Menggunakan LR 64 69
6.4 Langkah 1 : Perhitungan Penyebaran Gaya Berat 70
6.4.1 Perhitungan LWT 70
6.4.2 Perhitungan DWT 73
6.5 Langkah 2 : Perhitungan Gaya Tekan ke Atas, Gaya Geser dan Momen Lengkung Memanjang Kondisi Air Tenang 78
6.5.1 Penyebaran Gaya Tekan ke Atas Kondisi Air Tenang 78
6.5.2 Koreksi Berat dan Titik Berat 78
6.6 Langkah 3 : Perhitungan Gaya Tekan ke Atas, Gaya Geser dan Momen Lengkung Memanjang Kondisi Gelombang 79
6.6.1 Pembuatan Gelombang 79
6.6.2 Koreksi Kondisi Gelombang 80
6.7 Langkah 4 : Perhitungan Momen Inersia Midship Kapal, Defleksi dan Slope untuk Kondisi Air Tenang dan Gelombang 81
6.8 Langkah 5 : Pengecekan Perhitungan Sesuai dengan Tegangan yang Diizinkan Rules BKI 83

BAB 7. ANALISA KEANDALAN DALAM REKAYASA SISTEM KONSTRUKSI 85
7.1 Latar Belakang 85
7.2 Pengertian Ketidakpastian 86
7.3 Distribusi Peluang 87
7.3.1 Distribusi Normal 87
7.3.2 Distribusi Lognormal 90
7.4 Konsep Dasar Keandalan (*Reliability*) 91
7.5 Metode Mean Value First Order Second Moment (MVFOSM) 93
7.6 Indeks Keandalan Hasofer dan Lind 96
7.7 Simulasi dan Metode Monte Carlo 98
7.7.1 Konsep Umum 98
7.7.2 Penggunaan Simulasi Monte Carlo pada Analisa Keandalan Struktur 98

BAB 8. APLIKASI PENGGUNAAN ANALISA KEANDALAN METODE AFOSM UNTUK KASUS KEKUATAN KAPAL 101
8.1 Pendahuluan 101
8.2 Penetapan Moda Kegagalan/ Keadaan Batas (*Limit State*) 101
8.3 Penentuan dan Karakterisasi Perubah-perubah Dasar (*Basic Variable*) 103
8.3.1 Kapasitas Momen Bending Ultimat 103
8.3.2 Koefisien Cst 104
8.3.3 Koefisien C_2 104
8.3.4 Tinggi Gelombang 104
8.3.5 Koefisien K_b 105
8.4 Perhitungan Keandalan dengan Metode AFOSM 105
8.5 Perhitungan Kapasitas Momen Bending Ultimat 110

Listing Program Metode *AFOSM* 117

DAFTAR PUSTAKA 125
BIOGRAFI SINGKAT PENGARANG 127

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Perbandingan Sistem Konstruksi 25
Tabel 3.2 Hubungan Antara R_{EH} dengan k 27
Tabel 3.3 Baja Kekuatan Tinggi 28
Tabel 6.1 Resume Perhitungan Modulus Penampang 82
Tabel 6.2 Perhitungan Gaya Geser dan Momen Bending Memanjang 83
Tabel 8.1 Karakterisasi Perubah Dasar 105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kurva Biaya Fasilitas Bangunan Laut 4
Gambar 2.1 Spiral Perancangan Struktur 9
Gambar 3.1 Macam-macam Bentuk Lunas 17
Gambar 3.2 Alas Ganda dan Alas Tunggal 18
Gambar 3.3 Macam-macam Bentuk Wrang 19
Gambar 3.4 Dasar Gaya Konstruksi Memanjang dan Melintang 20
Gambar 3.5 Detail Konstruksi Lambung 21
Gambar 3.6 Sistem Konstruksi Memanjang dan Melintang pada Geladak 22
Gambar 3.7 Detail Sistem Konstruksi Memanjang pada Geladak 23
Gambar 3.8 Konstruksi Sekat 24
Gambar 4.1 Komponen-komponen Beban Statis pada Lambung Kapal 30
Gambar 4.2 Struktur Primer, Sekunder, dan Tertier 32
Gambar 4.3 Beban Statis, Gaya Lintang, dan Momen Lengkung 33

Gambar 5.1 Balok Ekuivalen 41
Gambar 5.2 Penampang Melintang Tengah Kapal 44
Gambar 5.3 Tipe-Tipe Sistem Penegaran 49
Gambar 5.4 Tegangan Bending dalam Panel Pelat 50
Gambar 5.5 Defleksi Pelat pada Tengah Panel 50
Gambar 5.6 Notasi Sistem Penegaran Panel 51
Gambar 5.7 Pelat yang Mengalami Tekuk Elastis 53
Gambar 5.8 Analisa Kekuatan Melintang pada Kapal Barang ... 59
Gambar 6.1 Grafik-Grafik Perhitungan Kekuatan Memanjang .. 63
Gambar 6.2 Pemodelan Kapal Akibat Momen Bending Memanjang 64
Gambar 6.3 Penampang Midship Kapal 81
Gambar 7.1 Distribusi Normal 88
Gambar 7.2 Distribusi Normal Standar 89
Gambar 7.3 Distribusi Lognormal 90
Gambar 7.4 Interferensi 2 Distribusi Peluang (Beban-Kekuatan) 92
Gambar 7.5 Fungsi Batas Linier 95
Gambar 7.6 Fungsi Batas Tak Linier 96
Gambar 8.1 Diagram Alir Metode AFOSM 116

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 UMUM

Untuk memanfaatkan laut dan berbagai sumber daya alam yang ada di-dalamnya, diperlukan sistem rekayasa yang dirancang dengan sepenuhnya memperhatikan tugas pokok sistem tersebut di laut dan dengan memperhatikan lingkungan laut tempat kerja sistem-sistem tersebut. Salah satu subsistem penyusun sistem rekayasa maritim tersebut, baik kapal maupun bangunan di lepas pantai, yang terpenting adalah strukturnya.

Sekalipun kekuatan struktur bukan satu-satunya kriteria yang harus diperhatikan – di samping kekakuan, biaya fabrikasi, biaya pemeliharaan, keandalan, dsb. – kekuatan merupakan salah satu kriteria yang terpenting, meskipun dengan tingkat yang berbeda antara kapal dan anjungan lepas pantai. Sebagai alat transportasi, rentabilitas (Rp/ton-km) merupakan kriteria kapal yang terpenting justru dalam kaitannya dengan struktur kapal tersebut, sementara untuk anjungan lepas pantai, seperti *fixed platform* misalnya, hal ini tidak selalu merupakan hal yang penting.

Ini mencerminkan bahwa keselamatan, baik personil maupun lingkungan hidup, sebagian dinyatakan sebagai fungsi dari kekuatan struktur tersebut. Sekalipun keselamatan sebuah sistem maritim tidak hanya ditentukan oleh kekuatan strukturnya – di samping keandalan subsistem-subsistemnya yang lain – kekuatan struktur memberi kontribusi yang cukup berarti bagi keselamatan sistem secara menyeluruh. Ini disebabkan subsistem struktur memberi wadah bagi penempatan subsistem-subsistem yang lain. Misalkan, sebuah anjungan tetap dilepas pantai berfungsi untuk memberikan suatu bidang kerja horisontal tempat manusia dan berbagai subsistem lainnya (elektrikal, mekanikal, gas, dsb) dapat bekerja secara normal terbebas dari lingkungan laut secara langsung.

Persyaratan keselamatan dapat dipandang dari dua sudut. Pertama, dari sudut pemerintah (sebagaimana tercermin dalam atau sebagian diwakili oleh *rules* dan *recommended practice*), yaitu *safety first, within economic bound*. Kedua, dari sudut perancang (atau pemilik) yang bermaksud menerapkan *design by first principles*, yaitu "*economic first, within safety limits*".

1.2 FITRAH KETIDAKPASTIAN PADA SISTEM REKAYASA MARITIM

Lingkungan laut merupakan sebuah lingkungan yang belum sepenuhnya kita pahami. Ini berarti bahwa beban-beban akibat lingkungan di laut, serta perilaku sistem-sitem maritim di laut belum dapat ditentukan dengan kepastian dan keakuratan yang tinggi. Dengan skala investasi yang tidak kecil, keselamatan teknis sistem-sistem maritim berarti juga jaminan keselamatan ekonomis. Masalahnya adalah, bahwa lingkungan ekonomi sebuah sistem rekayasa maritim sama tidak menentunya dengan lingkungan fisik sistem tersebut.

Risiko kegagalan, dengan konsekuensi teknomik yang amat besar, yang harus dihadapi oleh sebuah sistem rekayasa maritim umumnya lebih besar daripada sistem-sistem serupa yang ditempatkan di darat. Jelas sekali bahwa perancangan sistem-sistem rekayasa maritim harus dilakukan dalam lingkungan yang tidak pasti.

Untuk itu, dalam beberapa dekade terakhir telah diajukan pendekatan probabilistik dalam dunia rekayasa kelautan. Hal ini paling tidak terlihat pada usaha perubahan pada aturan-aturan (*rules*) ataupun *recommended practice* untuk perancangan dan pembangunan struktur-struktur maritim. Melalui pendekatan ini, *risiko* (peluang kegagalan) dapat secara lebih sistematik dikuantifikasikan, dan tingkat keselamatan dapat secara lebih rasional ditentukan. Hal ini dapat dinyatakan dalam *keandalan*, yaitu "peluang keberhasilan sebuah sistem untuk melakukan tugas tertentu dalam lingkungan tertentu selama periode waktu tertentu".

Angka keamanan, yang digunakan dalam pendekatan deterministik, diganti dengan angka keamanan parsial (*partial safety factor*) yang diberlakukan baik pada besaran-besaran kekuatan (*strength*) maupun besaran-besaran efek beban (*load effects*). Besarnya angka keamanan parsial ini diturunkan melalui telaah probabilistik yang pada dasarnya dihubungkan dengan tingkat keselamatan yang (secara psikologis) dapat diterima, keseriusan konsekuensi moda kegagalan yang mungkin, serta tingkat ketidakpastian yang melekat pada moda kegagalan tersebut.

Paling tidak terdapat tiga ketidakpastian (*uncertainty*) yang melekat pada setiap kegiatan rekayasa, yaitu pertama, *ketidak pastian fisik* akibat variabilitas besaran-besaran fisik, seperti tegangan, kekuatan tarik, modulus elastis bahan, beban, dsb. Untuk itu ketidakpastian fisik harus dinyatakan secara statistik, misalnya menggunakan harga rata-rata dan standar deviasinya.

Usaha ini masih tidak dapat meniadakan ketidakpastian kedua, yaitu *ketidakpastian statistik*. Hal ini disebabkan kedua parameter statistik yang

menggambarkan besaran-besaran fisik tertentu hanya benar untuk sampel besaran-besaran fisik tersebut. Ketidakpastian penting yang ketiga adalah ketidakpastian model (barangkali terpenting untuk sistem-sistem maritim) yang mencerminkan keterbatasan pengetahuan kita tentang perilaku yang sebenarnya dari sistem-sistem tersebut. Cara dan prosedur untuk memperlakukan ketidakpastian ini akan dibahas tersendiri.

1.3 MODA KEGAGALAN PADA STRUKTUR LAUT

Akibat ketiga ketidakpastian tersebut, sebuah struktur maritim dapat gagal berfungsi melalui berbagai moda kegagalan, seperti:

1) plastisitas lokal yang besar;
2) instabilitas (*buckling*);
3) retak (*fracture*) akibat kelelahan pada substruktur pendukungnya; ataupun
4) kegagalan pondasi

Contoh kasus kegagalan struktural yang kemudian diikuti kegagalan lainnya, yang terkenal adalah tenggelamnya semi-submersible Alexander L. Kielland di laut utara pada tahun 1980-an. Tragedi dipicu oleh kegagalan struktur (keretakan) pada sambungan las pada komponen struktur sekundernya yang segera diikuti oleh kegagalan komponen struktur primer, selanjutnya balangnya stabilitas, dan diakhiri dengan *capsizing*.

Moda kegagalan ini dapat terjadi di tingkat komponen struktur ataupun di tingkat subsistem struktur keseluruhan. Kegagalan pada tingkat komponen tidak selalu diikuti oleh kegagalan struktur keseluruhan untuk menoleransi kegagalan di tingkat komponen (*damage tolerance*).

Lebih lanjut, kemampuan ini ditentukan oleh bagaimana redistribusi reaksi reaksi internal pada struktur keseluruhan terjadi setelah terjadi kegagalan lokal di tingkat komponen. Redistribusi ini kemudian ditentukan oleh tata letak struktur, serta perilaku komponen setelah gagal (*post-failure behaviour*) yang dapat bersifat ulet (*ductile*), atau getas (*brittle*), atau di antara keduanya.

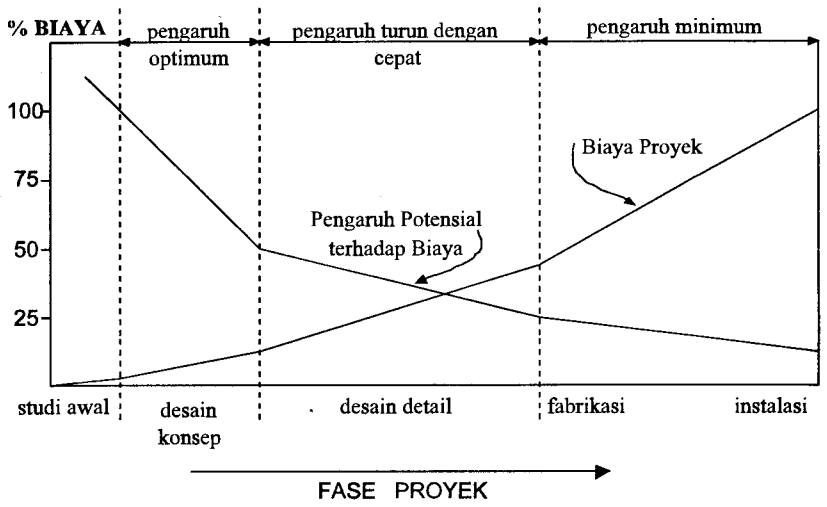
Dalam berbagai moda kegagalan yang mungkin terjadi, aspek terpenting dalam perbincangan kekuatan adalah tegangan bila kekakuan dikaitkan dengan lendutan. Secara umum dapat dikatakan, bahwa sebuah struktur dikatakan kuat apabila tegangan yang terjadi (atau terhitung) pada seluruh titik pada struktur tersebut masih di bawah tegangan kritis untuk semua moda kegagalan dan di seluruh daerah yang ditinjau. Untuk moda kegagalan plastisitas lokal, tegangan kritis yang dimaksud adalah tegangan luluh bahan; sementara untuk moda kegagalan instabilitas, tegangan kritis yang dimaksud adalah tegangan kritis yang mengakibatkan buckling.

1.4 TATALETAK, KEANDALAN DAN BIAYA

Penentuan tataletak struktur merupakan keputusan yang penting pada tahap awal perencanaan (*concept design*). Pada tahap ini, keputusan yang diambil mengandung konsekuensi biaya–biaya produksi, pemeliharaan, dan operasi – yang besar dalam arti bahwa potensi penghematan biaya berada pada tahap penentuan tataletak. Optimasi apapun yang dilakukan di atas tataletak yang keliru pada tahap desain detail tidak akan membantu mengurangi biaya terlalu banyak. (Gambar 1.1)

Di samping itu, tataletak memberi beberapa alternatif jalur kegagalan, sehingga mempengaruhi keandalan struktur sebagai sebuah sistem. Ini disebabkan tataletak akan mempengaruhi redistribusi respon-respon struktur setelah terjadi kegagalan di tingkat komponen.

Penghematan biaya akan mendorong pemilihan struktur dengan tataletak yang sederhana, sementara pertimbangan keandalan mungkin akan mendorong pemilihan struktur dengan tata letak yang lebih kompleks.



Gambar 1.1 Kurva Biaya Fasilitas Bangunan Laut

BAB 2
RANCANG BANGUN STRUKTUR KAPAL

2.1 FITRAH STRUKTUR KAPAL

Ukuran dan karakteristik utama sebuah kapal ditentukan terutama oleh misi atau pelayanan yang diinginkan. Di samping pertimbangan-pertimbangan fungsional tersebut, terdapat juga persyaratan lain seperti stabilitas, tahanan kapal yang kecil dan efisiensi propulsi yang tinggi, dan batasan-batasan pelayaran pada sarat atau lebar kapal, yang semuanya mempengaruhi pemilihan ukuran dan bentuk kapal. Struktur kapal harus dirancang dengan memperhatikan pertimbangan tersebut untuk menerima beban-beban yang akan diterima dari lingkungan laut. Dengan demikian struktur kapal memiliki beberapa karakteristik khas yang tidak ditemui pada struktur-struktur buatan manusia lainnya.

Dari karakteristik khas yang menonjol dan terpenting dari struktur kapal adalah ukuran, kompleksitas, kemultifungsian komponen-komponen struktur, keacakan atau fitrah probabilistik beban yang bekerja, dan ketidakpastian yang melekat pada kemampuan kita dalam memperkirakan respons struktur kapal terhadap pembebanan tersebut.

Berbeda sekali dengan struktur-struktur di darat, sebuah kapal tidak ditumpu pada suatu sistem tumpuan tetap tetapi memperoleh tumpuan menyeluruhnya dari gaya tekan ke atas yang diberikan oleh sebuah lingkungan fluida yang dinamis dan selalu berubah.

Metode-metode analisis yang dipakai oleh *naval architect* dalam merancang dan mengevaluasi struktur sebuah kapal harus dipilih dengan mengingat karakteristik tersebut. Selama dua puluh tahun terakhir ini perancangan dan analisa struktur kapal telah maju amat pesat yang mengarah pada praktek-praktek perancangan yang lebih rasional. Meskipun demikian, banyak aspek dalam struktur kapal belum sepenuhnya dapat dipahami melalui analisa murni, sehingga perancangan strukturnya masih tetap melibatkan gabungan yang bijaksana serta imajinatif antara teori dan pengalaman.

2.2 UKURAN DAN KOMPLEKSITAS STRUKTUR KAPAL

Kapal adalah struktur bergerak buatan manusia yang terbesar. Ukuran dan persyaratan mobilitas sebuah kapal memberi pengaruh yang sangat besar baik pada tataletak struktural maupun rancangannya.

Saat ini beroperasi tanker-tanker minyak raksasa dengan *displacement* penuh melebihi 600.000 ton, dengan ukuran panjang 400 m, lebar 63 m, dan tinggi 36 m, serta sarat sebesar 28,5 m. Kapal-kapal tersebut termasuk struktur yang paling kompleks dan hal ini sebagian disebabkan mobilitasnya.

Karakteristik tahanan dan propulsif yang baik mengharuskan bahwa permukaan luar lambungnya merupakan suatu permukaan lengkung 3 dimensi yang rumit. Karena pelat-pelat lambung merupakan salah satu komponen struktur utama kapal, maka konfigurasi struktur kapal tidak dapat selalu dipilih semata-mata di atas pertimbangan struktural belaka.

Lebih-lebih, perilaku struktur dengan komponen-komponennya yang rumit secara geometri yang membentuk lambung kapal amat sulit untuk dianalisa. Pembangunan kapalnya sendiri amat rumit karena jumlah komponen sederhana dan berulang tidak terlalu banyak.

2.3 FUNGSI BERGANDA KOMPONEN-KOMPONEN STRUKTUR KAPAL

Berbeda sekali dengan kebanyakan struktur darat, komponen-komponen struktur kapal seringkali dirancang untuk melakukan fungsi berganda disamping untuk memberikan integritas struktural pada kapal. Pelat lambung, misalnya, berfungsi tidak hanya sebagai komponen kekuatan utama, tetapi juga sebagai amplop kedap yang memiliki bentuk yang memberikan stabilitas yang cukup terhadap keolengan, tahanan yang kecil terhadap gerak maju kapal, sifat kemampukendalian (*controllability*) yang dapat diterima dan karakteristik propulsif yang baik.

Secara internal, banyak komponen struktur kapal memiliki fungsi berganda. Misalnya, sekat melintang yang berperan besar bagi kekuatan lambung kapal, juga berfungsi sebagai pembatas kedap pada ruang-ruang internal. Penempatan sekat-sekat melintang ini ditentukan oleh volume ruangan yang dibutuhkan, serta persyaratan panjang kebocoran. Tataletak geladak-geladak umumnya ditentukan oleh tataletak ruang-ruang internal, namun juga berfungsi untuk melawan beban-beban lokal merata ataupun terpusat, serta berfungsi sebagai komponen utama kekuatan memanjang dan melintang kapal.

Sekalipun dalam banyak hal efisiensi strukural menghendaki pemakaian balok, kolom, ataupun batang, fungsi-fungsi alternatif lainnya biasanya menghendaki pelat atau komponen-komponen lembaran (*sheet-type*). Komponen-komponen tersebut diatur bersama-sama dengan suatu sistem penegar untuk memberi kekuatan terhadap komponen-komponen beban berganda, beberapa di antaranya pada arah bidang pelat, yang lain tegak lurus padanya.

Karakteristik penting sebuah struktur kapal adalah komposisi strukturalnya yang terdiri dari beragam panel pelat berpenegar, yang beberapa diantaranya berbentuk datar, berbentuk lengkung 2 dimensi atau bahkan 3 dimensi yang membentuk kulit sisi dan las, geladak-geladak, dan sekat-sekat melintang. Oleh karena itulah, kebanyakan usaha yang dilakukan dalam analisa struktur kapal adalah dalam rangka menaksir kinerja panel-panel berpenegar individual serta interaksi antara panel-panel yang bersisian.

2.4 MODA-MODA KEGAGALAN STRUKTUR KAPAL

Tujuan utama seorang perancang struktur adalah menghindari terjadinya kegagalan struktural. Untuk mencapai tujuan ini, seorang perancang kapal harus menyadari adanya moda-moda kegagalan struktural yang mungkin terjadi, dan metode-metode untuk meramalkan kejadian kegagalan tersebut. Jenis moda-moda kegagalan yang dapat terjadi pada struktur kapal umumnya adalah moda-moda kegagalan yang khas terdapat pada struktur-struktur yang terdiri dari sistem pelat berpenegar yang dirakit dengan proses pengelasan untuk membentuk sebuah struktur monolitik dengan cadangan kekuatan yang besar (*structural redudancy*).

Harus dicatat di sini bahwa kegagalan struktur dapat terjadi dalam berbagai tingkat keparahan. Pada tingkat keparahan terkecil adalah retak atau deformasi kecil pada komponen struktur sekunder yang tidak mempengaruhi kemampuan mendasar struktur ini untuk melakukan fungsinya. Kegagalan kecil ini hanya memiliki konsekuensi estetika. Pada tingkat keparahan paling serius adalah kegagalan struktur secara katastropik yang menyebabkan tenggelamnya kapal.

Diantara dua tingkat keparahan ekstrem ini terdapat beragam moda kegagalan yang mungkin dapat mengurangi kemampuan menyangga beban dari komponen-komponen struktur individual, namun tidak harus menyebabkan kegagalan struktur menyeluruh. Kegagalan-kegagalan ini biasanya dapat diketahui dan diperbaiki sebelum jumlah dan besarnya bertambah sampai pada tingkat membahayakan.

Disamping tubrukan dan kandas, paling tidak terdapat empat mekanisme utama yang menyebabkan kegagalan struktur kapal, yaitu 1) luluh (*yield*) akibat tarikan ataupun tekanan yang berlebih, 2) buckling akibat ketidakstabilan geser atau tekan, 3) retak kelelahan, 4) pecah getas.

2.5 FALSAFAH DAN PROSEDUR PERANCANGAN STRUKTUR KAPAL

Pengembangan suatu prosedur perancangan struktur yang sepenuhnya rasional telah dilakukan dalam berbagai bidang, termasuk struktur kapal. Dengan mengunakan prosedur ini, dimungkinkan untuk pertama-tama merumuskan suatu persyaratan atau kriteria yang harus dipenuhi oleh struktur tersebut, dan kemudian, melalui penerapan konsep-konsep dasar dan analisa matematik, ditunjang oleh informasi-informasi empiris tertentu, memperoleh suatu konfigurasi struktural dan ukuran-ukuran struktur yang sekaligus memenuhi semua kriteria yang dipersyaratkan.

Persyaratan-persyaratan ini mencakup persyaratan fungsional dari pemilik, dan persyaratan kelembagaan yang ditetapkan oleh pemerintah dan lembaga-lembaga berwenang lainnya yang berkepentingan dengan aspek-aspek keselamatan, navigasi, pencegahan pencemaran lingkungan, pengukuran tonnase, dan standar-standar perburuhan.

Pemilihan ukuran utama kapal dan tataletak kapal untuk memenuhi persyaratan tersebut merupakan tanggung jawab *naval architect* dan telah ditentukan pada tahap *concept design*. Dengan demikian, dalam merancang komponen-komponen primer (utama) struktur kapal, dapat dianggap bahwa ukuran-ukuran utama kapal dan pembagian ruangan-ruangan di dalamnya dengan menggunakan sekat melintang, geladak, dan batas-batas tangki telah ditentukan untuk memenuhi persyaratan tersebut.

Permasalahan perancangan struktur kapal kemudian mencakup pemilihan jenis bahan, jarak gading, ukuran gading dan penegar, tebal pelat, dsb., yang apabila digabungkan dalam konfigurasi geometrik tersebut memungkinkan kapal untuk melakukan fungsinya secara efisien selama masa operasi yang direncanakan.

Perancangan struktur kapal mencakup proses bertahap dan iteratif. Selama proses ini, perancang mengembangkan suatu konfigurasi struktur didasarkan pada pengalaman, intuisi, dan imajinasi, selanjutnya melakukan suatu analisa atas dasar struktur tersebut untuk menilai kinerjanya. Jika perlu, ukuran-ukuran struktur dapat diubah sampai kriteria perancangan dipenuhi. Konfigurasi yang dihasilkan kemudian diubah dengan cara tertentu untuk memperbaiki kinerjanya, atau harganya, dan analisa kemudian dilakukan kembali untuk memastikan konfigurasi yang sudah diperbaiki masih tetap memenuhi kriteria perancangan.

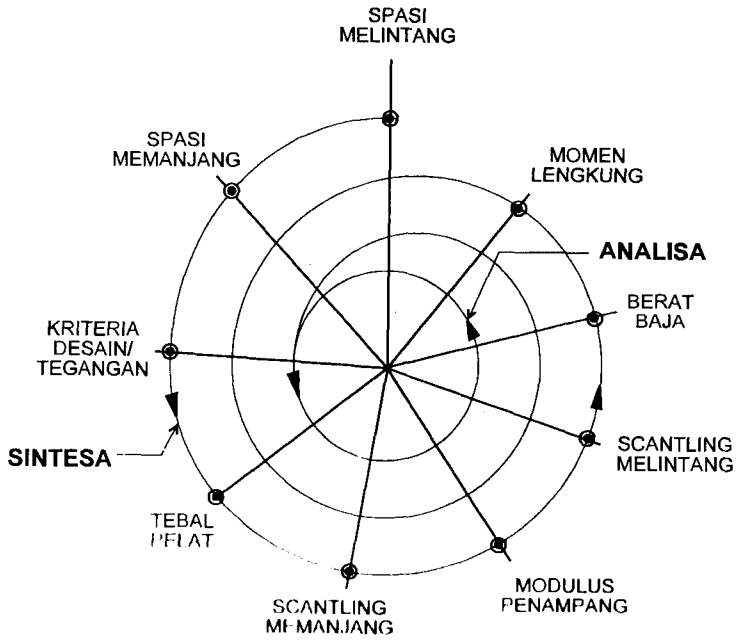
Dengan demikian, suatu elemen kunci dalam perancangan struktur adalah proses *analisa* untuk mengevaluasi sebuah struktur tertentu. Proses menemukan

MILIK

suatu konfigurasi struktur yang memiliki kinerja yang diinginkan melalui proses *sintesa* adalah kebalikan dengan proses analisa, dan tidak selangsung proses analisa, khususnya untuk struktur-struktur kompleks seperti kapal. Sebagai akibatnya, diperlukan beberapa kali sintesa sampai diperoleh konfigurasi struktural yang optimum. Secara singkat, proses perancangan struktur ditandai oleh empat langkah pokok (secara intuitif ataupun matematis), yaitu :

1. Menetapkan suatu konfigurasi dan ukuran awal;
2. Menganalisa perilaku rancangan tersebut;
3. Membandingkan perilaku rancangan dengan perilaku (kriteria perancangan) yang dapat diterima;
4. Merancang kembali dengan mengubah konfigurasi dan ukuran rancangan untuk memperbaiki kinerja struktur;
5. Mengulang langkah ke-2 sampai ke-4 terus menerus sampai diperoleh sebuah rancangan optimal (pada saat kinerja struktur tidak dapat diperbaiki lagi).

Proses perancangan struktur iteratif ini dapat dilukiskan sebagai sebuah spiral perancangan sebagai berikut:



Gambar 2.1 Spiral Perancangan Struktur

BAB 3
KERANGKA DASAR KONSTRUKSI KAPAL, PEMILIHAN BAHAN DAN MATERIAL KAPAL

3.1 PENDAHULUAN

Secara prinsip, konstruksi kapal merupakan susunan panel berpenegar (*stiffened panels*) yang diletakkan untuk membentuk ruang 3-D yang melindungi muatan dan atau personel yang ada di dalam ruang tersebut dari lingkungan air di sekitarnya. Sebuah panel (misalkan panel geladak) dibentuk dengan menyambung dua atau lebih pelat dengan proses las tumpul (*butt weld/joint*), sedangkan penegar (*stiffeners*) dengan bentuk profil tertentu dilaskan pada panel tersebut dengan proses las Tee (*T joint*) dengan spasi tertentu. Panel-panel tersebut lazimnya membetuk panel ortotropik, karena penegaran dilakukan pada dua arah yang saling tegak lurus.

Pada umumnya konstruksi kapal terdiri dari badan kapal beserta bangunan atas dan/atau rumah geladak . Badan kapal terdiri dari lambung kiri dan lambung kanan, dasar dan satu atau beberapa geladak. Bangunan atas (*super structure*) adalah bangunan tambahan yang terletak di bagian atas badan kapal, panjangnya adalah sebagian panjang geladak, dan pada beberapa hal mungkin sepanjang geladak. Bangunan atas yang terletak di sebelah depan kapal, dimulai dari linggi muka disebut *forecastle* (akil), sedangkan bangunan atas yang terletak di tengah dinamai *bridge* dan yang terletak di belakang disebut *poop* (kimbul).

Dinding belakang dan muka bangunan atas disebut dinding sekat belakang dan dinding muka bangunan atas. Pada beberapa kapal dinding-dinding ini mungkin mempunyai pintu, tetapi harus dijamin kekedapannya agar bangunan atas tersebut dapat disebut bangunan atas kedap air. Dinding atas yang menutupi bangunan atas disebut geladak bangunan atas. Pada geladak yang teratas atau pada geladak bangunan atas kadang-kadang terletak rumah geladak atau *deck house*. Lebar rumah geladak ini selalu lebih kecil dari lebar geladak kapal.

Pada geladak terbuka yang teratas atau bangunan atas dibuat lubang untuk keluar-masuknya barang dan orang, dimana melalui lubang ini air dapat ma-

suk dari geladak. Untuk melindungi ruangan dalam dari masuknya air, dibuat *companionways*, *hatch-ways*, *bunker hatches* dan *casing of the machinery space* (*engine casings*). Pada arah panjang, lebar dan tinggi badan kapal dibagi oleh bidang-bidang konstruksi, menjadi ruangan-ruangan tersendiri, yang berguna untuk penempatan barang-barang, mesin-mesin, bahan bakar dll. Pembagian menjadi ruangan-ruangan tersendiri berguna juga membantu agar kapal tersebut tetap terapung bila salah satu ruangan terisi air, mencegah menjalarnya kebakaran, untuk kekuatan kapal dll. Bidang konstruksi yang membagi badan kapal dalam ruangan-ruangan pada arah tingginya disebut geladak. Geladak yang memanjang di seluruh panjang kapal (*continuous deck*) dan dari lambung kiri ke lambung kanan disebut geladak penuh. Bidang konstruksi yang membagi badan kapal pada arah melintang dan memanjang disebut sekat-sekat melintang (*transverse bulkhead*) dan memanjang (*longitudinal bulkhead*).

Dinding-dinding sekat membagi badan kapal dalam ruangan-ruangan yang kedap air. Sekat-sekat ini dibuat sampai geladak penuh yang teratas atau kedua dari atas yang kontinu, bergantung dari tipe arsitektur kapal. Ruangan yang terletak antara geladak kedua disebut ruang antar geladak atau *tweendeck*. Ruangan di bawah geladak yang terbawah disebut ruangan palkah.

Ruangan-ruangan pada ujung-ujung kapal di bawah geladak terbawah (di muka dinding sekat kedap air yang terdepan dan di belakang dinding sekat kedap air yang paling belakang) dinamai *after peak* dan *fore peak*. Dinding sekat yang membatasi ruangan-ruangan tersebut yang dimuka disebut dinding sekat tubrukan (*collision bulkhead*) dan yang dibelakang disebut dinding sekat buritan (*after peak bulkhead*)

Untuk pemuatan barang pada ruang palkah dan *tweendeck*, pada geladak dibuat lubang yang dinamai lubang palkah (*hatchway*). Lubang ini dibatasi dengan dinding vertikal yang disebut ambang palkah (*hatch coaming*). Pada tepi geladak dipasang kubu-kubu (*bulwark*) yang berfungsi untuk melindungi kemungkinan jatuhnya orang keluar kapal dan menghindari melimpahnya air laut ke geladak pada waktu laut berombak. Untuk mengalirkan air laut yang melimpah keluar kapal maka pada kubu-kubu dibuat lubang yang dinamai lubang pembebasan (*freeing port*). Pada geladak yang lebih atas, kubu-kubu diganti pagar yang berupa pipa-pipa dan bilah-bilah pelat.

3.2 SISTEM KONSTRUKSI

Pada dasarnya badan kapal terdiri dari komponen-komponen konstruksi yang letaknya arah melintang dan memanjang. Dalam penyusunan komponen komponen tersebut menjadi konstruksi badan kapal secara keseluruhan dikenal beberapa cara yang biasa dipakai dalam praktek, antara lain

1. Sitem konstruksi melintang
2. Sistem konstruksi memanjang
3. Sistem konstruksi kombinasi/campuran

3.2.1 Sistem Konstruksi Melintang

Sistem konstruksi melintang merupakan konstruksi dimana beban yang bekerja pada konstruksi diterima oleh pelat kulit dan diuraikan pada hubungan-hubungan kaku/ balok-balok memanjang dari kapal dengan pertolongan balok-balok yang melintangi kapal. Dalam hal ini sebagai tumpuan kaku untuk balok-balok melintang dasar (*wrang,floor*) ialah lambung kapal, dinding-dinding sekat memanjang, dan (*centre girder*) penumpu tengah. Beban konstruksi geladak dilanjutkan dengan pertolongan balok melintang dari rangka geladak (balok geladak/*beams*) ke hubungan kaku yaitu lambung kapal dan dinding sekat memanjang. Beban dari konstruksi lambung dilanjutkan ke geladak dan dasar kapal dengan pertolongan balok-balok melintang yaitu gading-gading (*frame*).

Perlu diperhatikan bahwa pada sistem rangka konstruksi melintang, biarpun ada balok-balok memanjang, bila balok-balok memanjang ini merupakan kekakuan yang kecil, tidak akan menahan balok-balok melintang di tengah. Balok-balok di tengah ini akan dengan sendirinya melanjutkan gaya ke hubungan memanjang yang kaku.

Fungsi balok-balok memanjang adalah :

1. menjaga kestabilan bentuk lengkungan balok-balok melintang;
2. untuk pembagian gaya yang terpusatkan pada beberapa balok melintang utama yang berdekatan.

Pada waktu jarak antara dinding-dinding sekat melintang cukup besar, kekakuan lunas dalam/ penumpu tengah dan samping mungkin tidak cukup, yang mengakibatkan balok-balok memanjang tidak akan menahan tengah-tengah wrang. Dalam hal ini bracket dari lunas dalam/ penumpu samping ialah untuk mempertinggi keseimbangan bentuk lengkungan dari wrang-wrang.

Kelebihan dari kerangka konstruksi melintang:

1. konstruksi sederhana
2. mudah dalam pembangunannya
3. kekuatan melintang baik.

Kekurangan dari konstruksi melintang:

1. kestabilan dari pelat kulit kecil
2. kekuatan memanjang jelek
3. untuk kapal-kapal yang pendek.

3.2.2 Sistem Konstruksi Memanjang

Sistem rangka konstruksi memanjang ialah konstruksi dimana padanya bekerja beban yang diterima oleh rangka konstruksi dan diuraikan pada hubungan-hubungan kaku melintang kapal dengan pertolongan balok memanjang. Dalam hal konstruksi, walaupun ada balok-balok melintang, tetapi bila balok tersebut merupakan kekakuan yang kecil dalam hubungan konstruksi tidak menahan (memegang) balok-balok memanjang, maka sistem konstruksi tetap disebut sistem konstruksi memanjang.

Kebaikan dari sistem konstruksi memanjang:

1. kekuatan memanjang baik
2. kekakuan konstruksi lebih stabil

Kekurangan dari sistem konstruksi memanjang

1. pembangunan kapal lebih sulit
2. konstruksi melintang jelek.

3.2.3 Sistem Konstruksi Kombinasi

Karena adanya kekurangan pada sistem konstruksi melintang maupun konstruksi memanjang, maka akan timbul pemakaian sistem konstruksi kombinasi. Dalam sistem kombinasi ini, sistem rangka konstruksi memanjang dipakai pada geladak utama dan dasar kapal, dimana letak konstruksi ini jauh dari sumbu netral penampang melintang kapal sehingga menerima beban lengkung yang besar.

Sedangkan pada geladak kedua yang lebih dekat ke sumbu netral cukup memakai sistem rangka konstruksi melintang. Untuk rangka konstruksi lambung kapal, meskipun berfungsi untuk menahan momen lengkung memanjang tetapi fungsi utama adalah untuk menahan gaya tekan hidrostatis dari samping (melintang). Jadi sebaiknya juga memakai sistem rangka konstruksi melintang. Pada ujung-ujung kapal, mengingat momen lengkung sudah mengecil dan mendekati nol, juga dipakai sistem rangka konstruksi melintang. Untuk memperpendek jarak bentang balok memanjang pada geladak, dapat dilaksanakan dengan memasang topang (*pillar*).

Sistem konstruksi tersebut dibagi lagi dalam kerangka konstruksi: 1. Kerangka konstruksi alas (*bottom*) 2. Kerangka konstruksi lambung/sisi (*side*) dan 3. Kerangka konstruksi geladak (*deck*). Kerangka konstruksi tersebut diperkuat oleh bagian konstruksi berupa profil-profil penguat/ penegar dan pelat-pelat. Terlebih dulu kita bahas mengenai kerangka konstruksi dasar (*bottom*) beserta profil-profil yang ikut didalamnya:

- ***Struktur Konstruksi Alas (Bottom)***

Pada awalnya kapal dibangun dengan menggunakan single bottom, tetapi untuk meningkatkan keselamatan maka dibuatlah kapal dengan dasar *double bottom* (alas ganda).

Struktur alas dibagi-bagi lagi dalam beberapa bagian yang lebih detail:

a. *Lunas (Keel)* (lihat Gambar 3.1)

Lunas adalah balok memanjang didasar kapal yang terletak pada bidang memanjang kapal antara linggi muka dan linggi belakang sepanjang kapal. Lunas merupakan bagian konstruksi terpenting pada suatu kapal. Dalam perkembangannya dikenal beberapa macam konstruksi lunas yaitu lunas batang, lunas berlapis, lunas kotak dan lunas datar horisontal.

Lunas batang dipakai pada kapal-kapal tunda, kapal ikan, kapal layar, yang gunanya untuk memperkecil pergeseran kesamping dan memperbaiki kemampuan manuver dan stabilitas kapal.

Lunas berlapis terutama dalam konstruksi keling untuk mempermudah pembuatan lunas batang. Lunas berlapis terdiri dari beberapa lapis pelat yang dikeling bersama-sama dengan pelat kulit sehingga merupakan konstruksi lunas yang mempunyai ukuran sama dengan lunas batang. Lapisan yang di tengah merupakan kelanjutan lunas dalam tengah.

Lunas kotak dipakai karena adanya perubahan dari bentuk dasar runcing ke bentuk dasar rata, juga karena bertambah besarnya ukuran kapal, konstruksi lunas juga mengalami perubahan. Lunas kotak terdiri atas dua pelat vertikal yang terletak di sebelah kiri dan kanan bidang memanjang kapal, yang dilas atau dikeling dengan pelat lunas horisontal dan pelat lunas dalam.

Lunas datar horisontal merupakan lunas yang sering dipakai pada kapal-kapal saat ini. Pelat lunas horisontal terdiri dari suatu pelat tebal yang diletakkan pada dasar bidang memanjang kapal, yang merupakan pelat tengah dari pelat alas. Pelat lunas mempunyai penebalan yang cukup nyata dibandingkan pelat dasar lainnya.

b. *Struktur Alas Tunggal* (*Single Bottom*) (lihat Gambar 3.2)

Untuk kapal kecil sebagian besar menggunakan konstruksi alas tunggal. Sistem rangka dasar tunggal terdiri dari balok melintang wrang (*floor*), balok memanjang yaitu : penumpu tengah alas (*centre girder*) yang terletak tepat pada *centre line* kapal dan penumpu samping alas (*side girder*), pelat alas (*bottom plate*), pembujur alas (*bottom longitudinal*) dan lajur bilga (*bilge strake*) .

c. *Struktur Alas Ganda* (*Double Bottom*) (lihat Gambar 3.2 , 3.3 dan 3.4)

Untuk kapal modern (baru), karena pertimbangan faktor keamanan dan juga untuk peletakan ballast cair maka dipakai sistem alas ganda, terutama untuk kapal-kapal yang yang besar atau panjang di atas 80 m. Sistem rangka dasar ganda terdiri dari balok melintang wrang (*floor*), balok memanjang yaitu : penumpu tengah alas (*centre girder*) yang terletak tepat pada *centre line* kapal dan penumpu samping alas (*side girder*), pelat alas (*bottom plate*) , pelat alas dalam (*inner bottom plate*), pembujur alas (*bottom longitudinal*), pembujur alas dalam (*inner bottom longitudinal*) dan lajur bilga (*bilge strake*).

- ***Struktur Lambung (Side)*** (lihat Gambar 3.5)

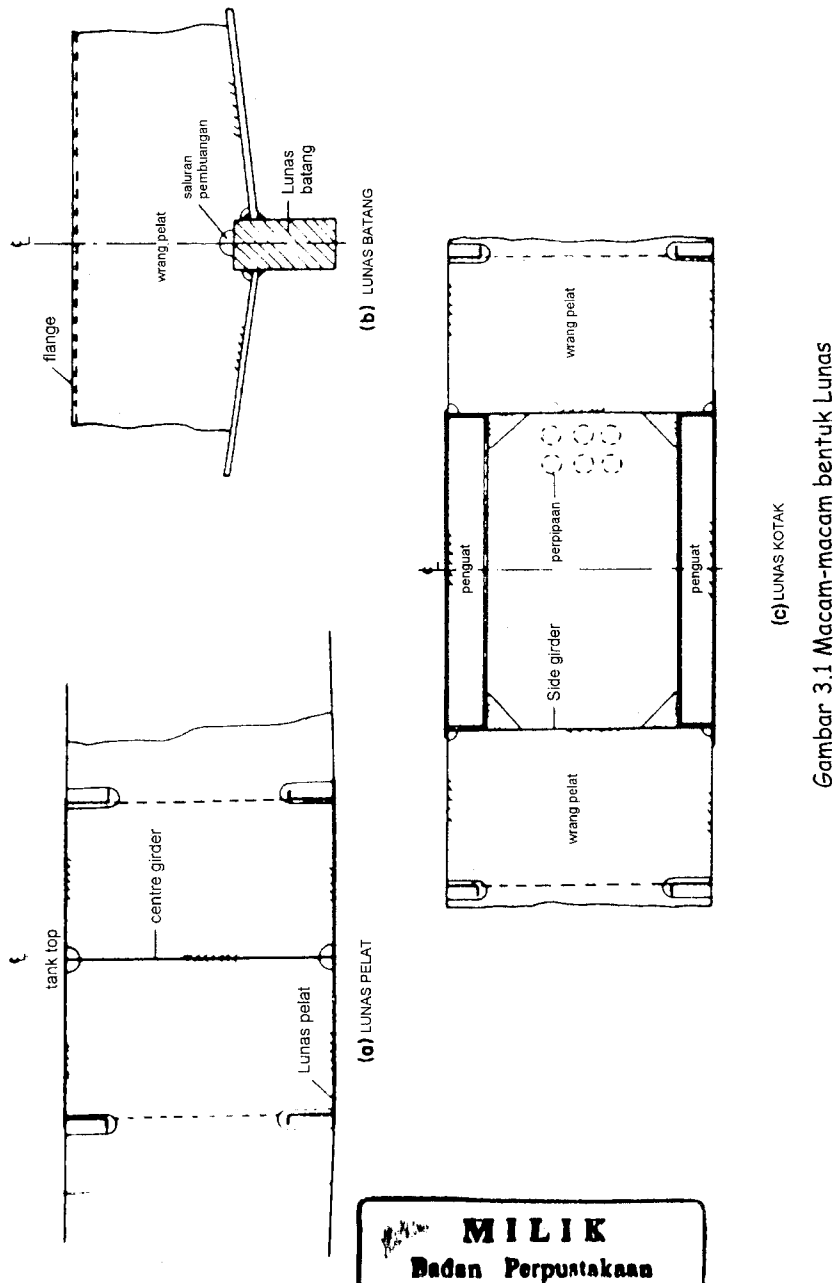
Konstruksi lambung sebagai bagian dari sistem rangka konstruksi kapal secara keseluruhan, disamping berfungsi sebagai dinding sisi kapal yang menahan tahanan air dari samping, juga berfungsi sebagai penerus gaya-gaya yang diterima geladak untuk disalurkan ke konstruksi kerangka dasar, terutama pada sistem rangka konstruksi melintang. Untuk ini pelat lambung (*side plate*) termasuk juga lajur atas (*sheer strake*) diperkuat dengan penegar-penegar vertikal yang disebut gading (*frame*), juga pembujur sisi (*side longitudinal*) dan senta sisi (*side stringer*).

- ***Struktur Geladak (Deck)*** (lihat Gambar 3.6 dan 3.7)

Konstruksi geladak disamping berfungsi untuk kekedapan kapal, juga untuk melindungi barang-barang muatan dan ruang tempat tinggal anak buah kapal. Geladak juga berfungsi menambah kekuatan memanjang kapal dan sebagian juga kekuatan melintang. Konstruksi dari geladak terdiri dari pelat geladak (*deck plate*), balok geladak (*deck beam*), pembujur geladak (*deck longitudinal*), penumpu geladak (*deck girder*).

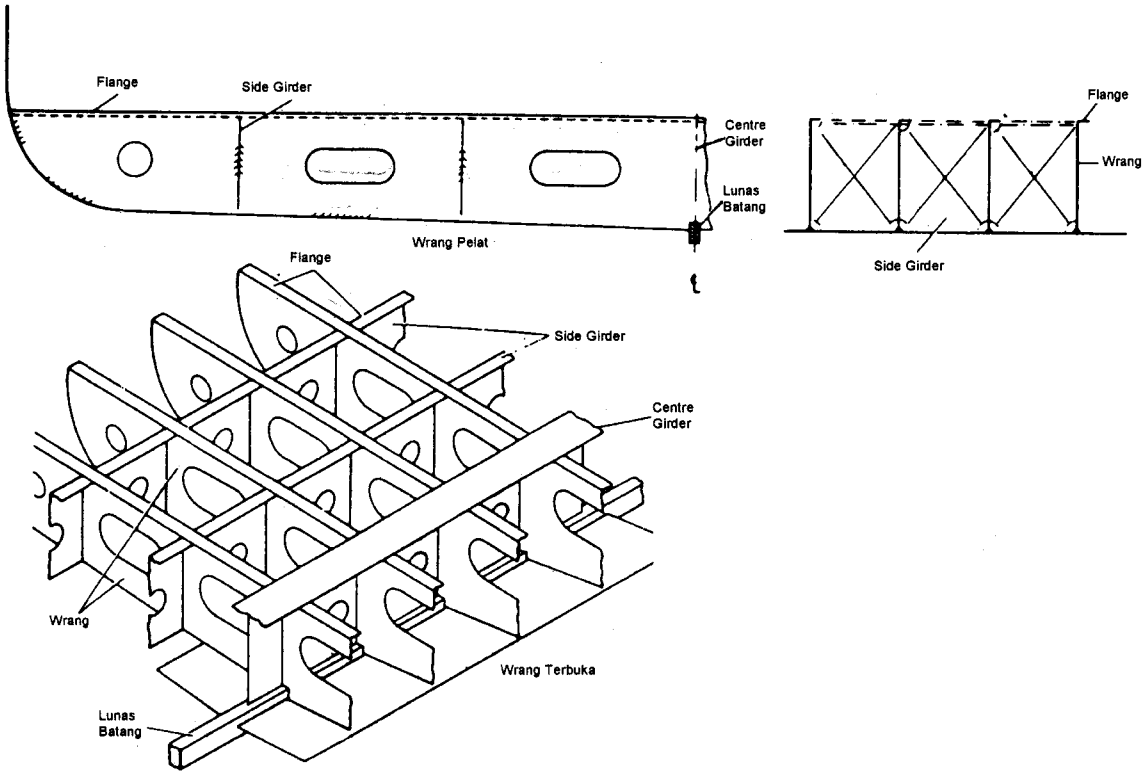
Selain tiga kerangka konstruksi di atas ada konstruksi yang sangat berperan dalam kekuatan memanjang maupun melintang kapal yaitu sekat (*bulk*

head) baik sekat melintang (*transverse bulkhead*) ataupun sekat memanjang (*longitudinal bulkhead*), sesuai dengan gambar.

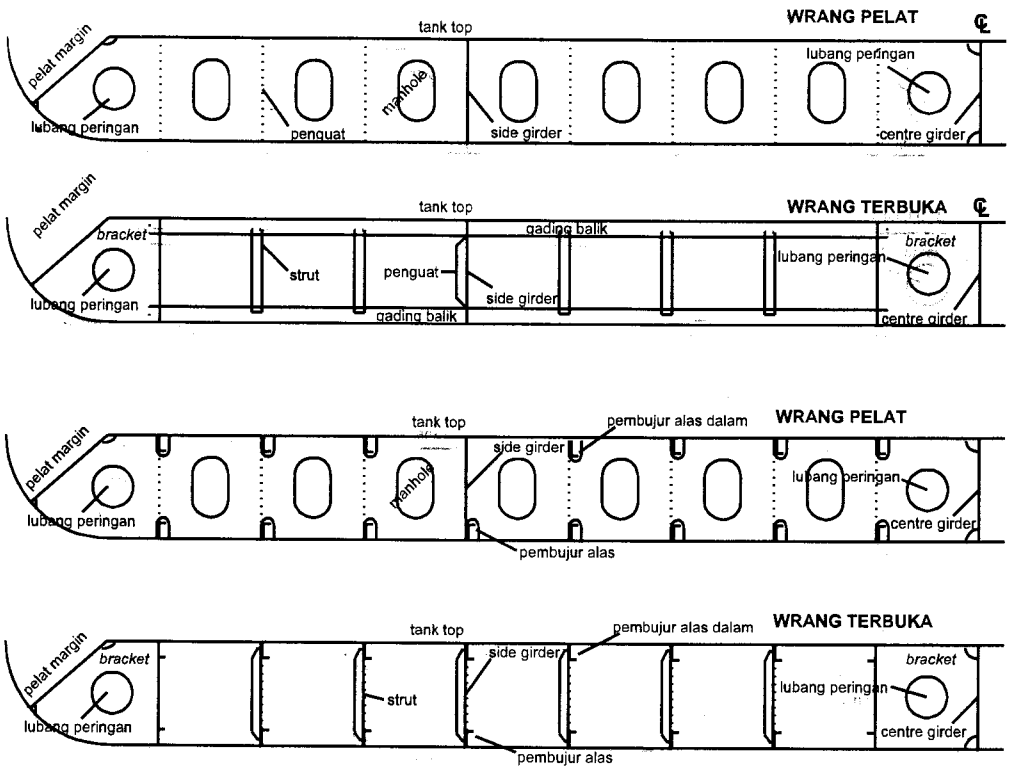


Gambar 3.1 Macam-macam bentuk Lunas

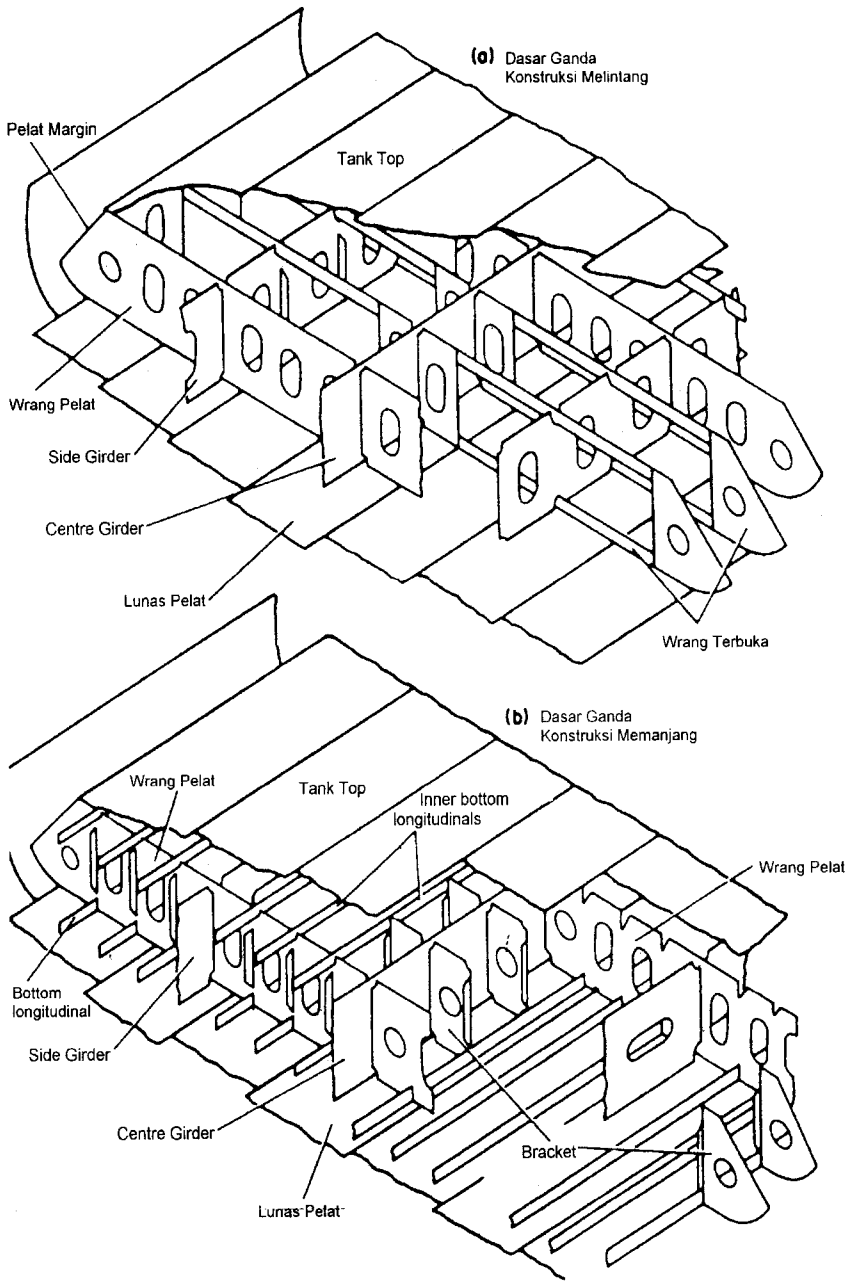
MILIK
Badan Perpustakaan



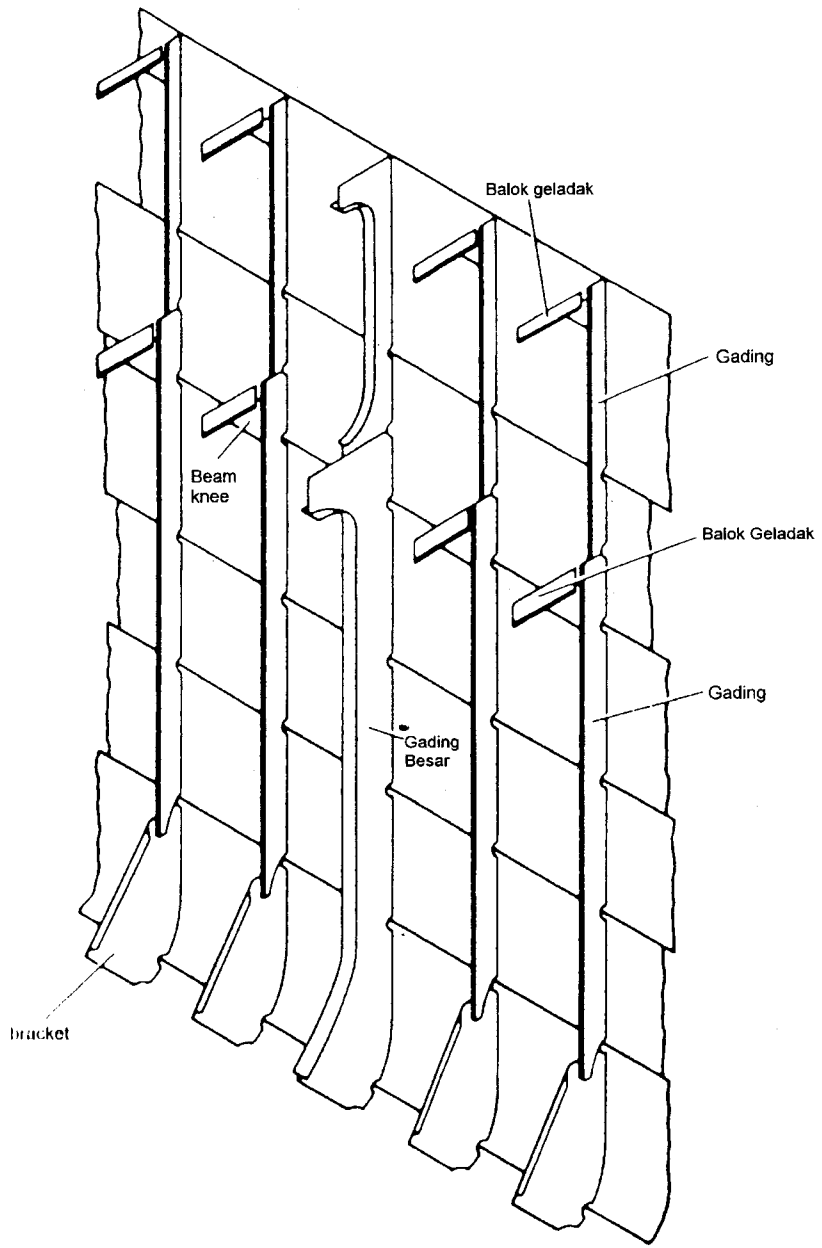
Gambar 3.2 Alas Ganda dan alas Tunggal



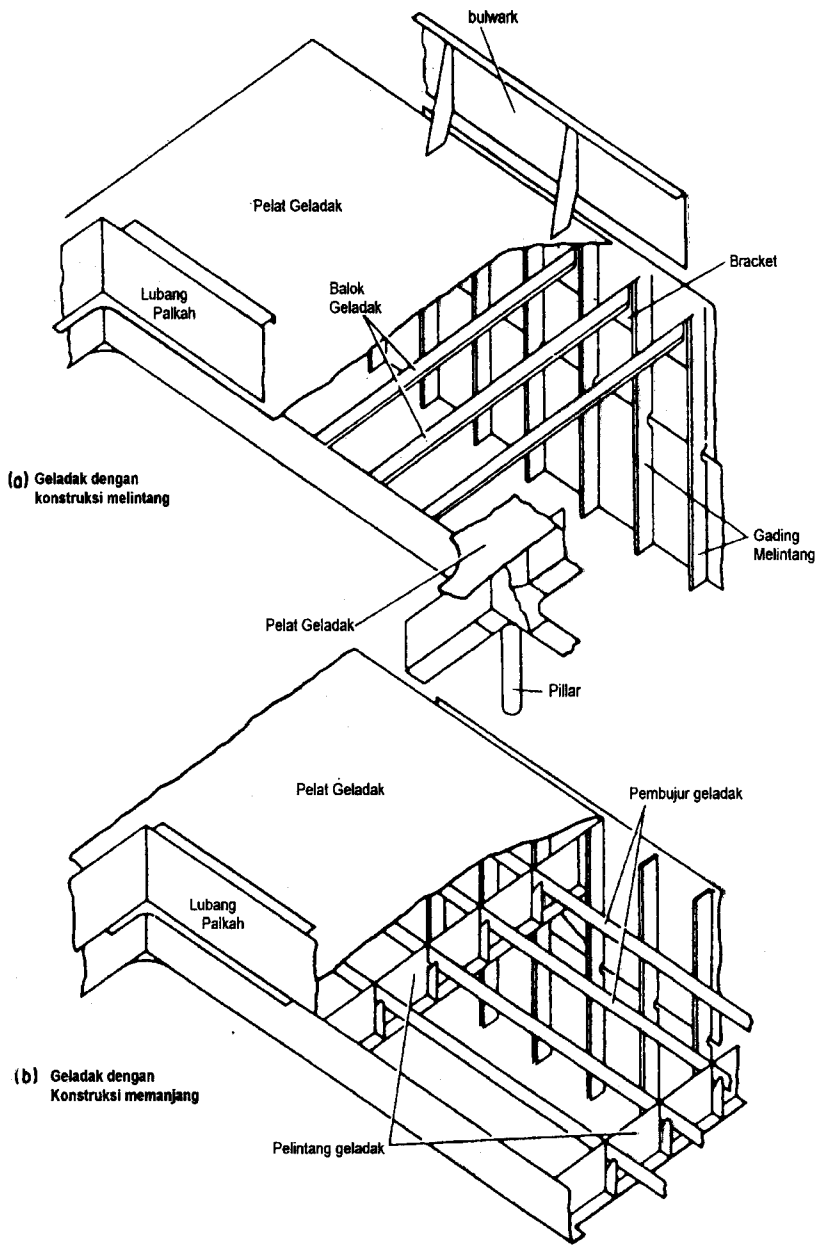
Gambar 3.3 Macam-macam Bentuk Wrang



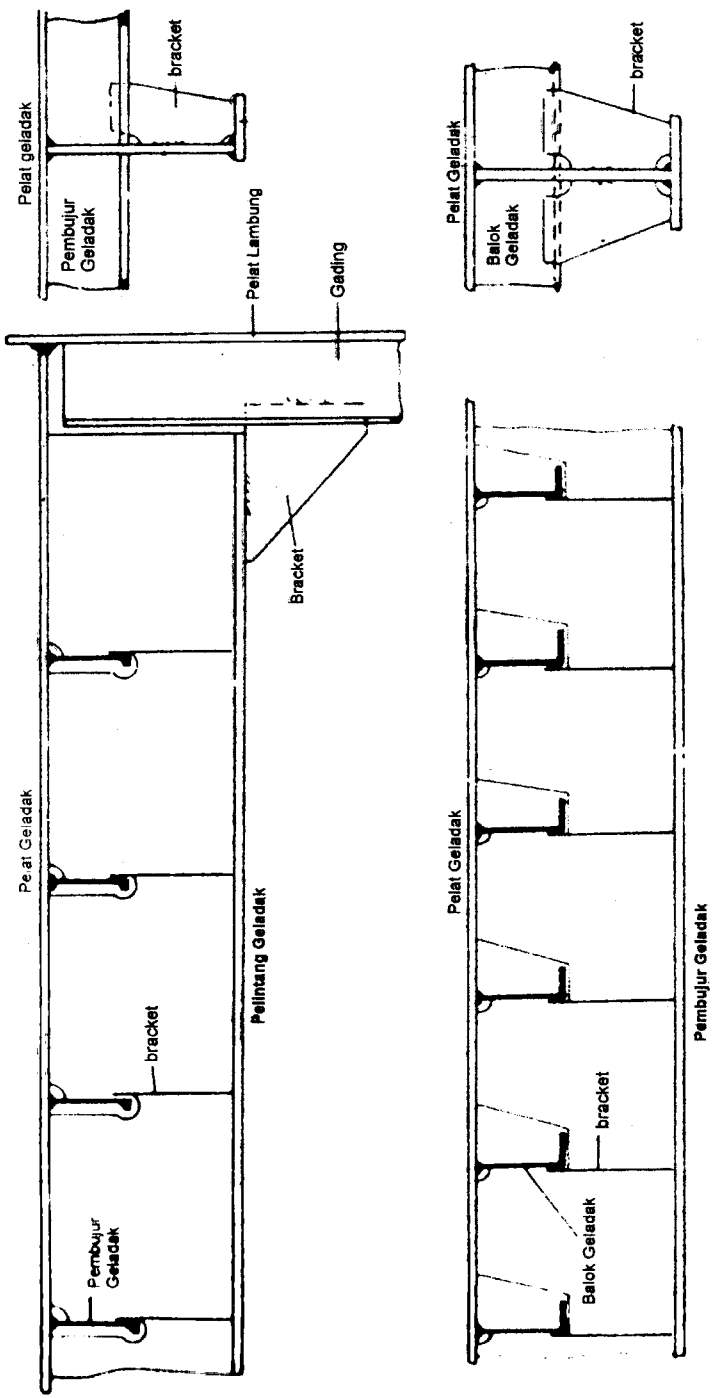
Gambar 3.4 Dasar Gaya Konstruksi Memanjang dan Melintang



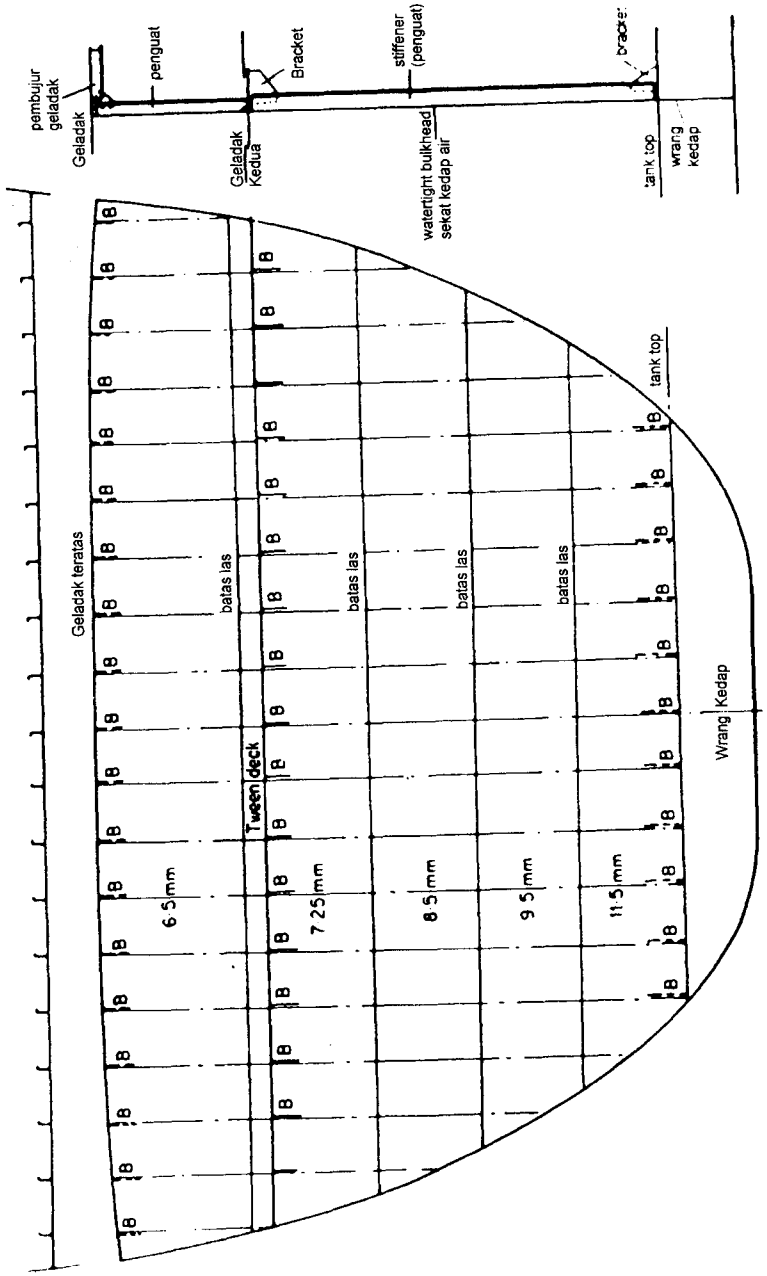
Gambar 3.5 Detail Konstruksi Lambung



Gambar 3.6 Sistem Konstruksi Memanjang dan Melintang pada Geladak



Gambar 3.7 Detail Sistem Konstruksi Memanjang pada Geladak



Gambar 3.8 Konstruksi Sekat

Untuk memudahkan pengertian sistem konstruksi tersebut maka dibuat tabel sebagai berikut:

Tabel 3.1 Perbandingan Sistem Konstruksi

	Sistem Konstruksi Melintang	Sistem Konstruksi Kombinasi	Sistem Konstruksi Memanjang
GELADAK (DECK)			
Profil / Penegar yang mendukung kekuatan melintang	- balok geladak * - balok besar (*strong beam*) - *kantilever*	- pelintang geladak (*deck transverse*)	- pelintang geladak
Profil / Penegar yang mendukung kekuatan memanjang	- penumpu geladak tengah/ samping	- pembujur geladak * - penumpu geladak	- pembujur geladak * - penumpu geladak (deck girder)
LAMBUNG (SIDE)			
Profil / Penegar yang mendukung kekuatan melintang	- gading (*frame*) * - gading besar (*web frame*)	- gading (*frame*) * - gading besar (*web frame*)	- pelintang sisi (*transverse web*)
Profil / Penegar yang mendukung kekuatan memanjang	- senta sisi (*side stringer*)	- senta sisi (*side stringer*)	- pembujur sisi * - senta sisi
DASAR (BOTTOM)			
Profil / Penegar yang mendukung kekuatan melintang	- wrang (*floor*)	- pelintang alas (*bottom tranverse*)	- pelintang alas (*bottom tranverse*)
Profil / Penegar yang mendukung kekuatan memanjang	- penumpu tengah - penumpu samping	- pembujur alas * - penumpu tengah - penumpu samping	- pembujur alas * - penumpu tengah - penumpu samping

Catatan : * = profil penegar tersebut dipasang hampir tiap jarak gading atau pembujur.

3.3 PEMILIHAN BAHAN KONSTRUKSI KAPAL

Perancang struktur kapal, berbeda dengan seorang metalurgis, jarang sekali berminat pada karakteristik mikro bahan konstruksi kapal, namun lebih tertarik pada perilaku bahan tersebut apabila menerima beban. Perancang struktur kapal lebih menaruh perhatian pada karakteristik umum yang mencerminkan perilaku bahan tersebut.

Sifat-sifat bahan yang diinginkan tampaknya terlalu jelas bagi sang perancang struktur sehingga kurang mendapatkan perhatian yang cukup. Baja lunak menengah (*medium, mild steel*) seolah-olah menjadi pilihan yang paling wajar dan dilakukan secara serta-merta. Namun demikian, ada baiknya dilakukan kajian pendek mengenai sifat-sifat utama bahan struktur kapal yang penting untuk membuka peluang pemilihan bahan struktur yang terbaik.

Lambung kapal dibangun sebagian besar dengan bahan baja. Pada kapal-kapal yang lebih besar, aluminium semakin banyak digunakan untuk bangunan atas kapal. Kapal-kapal tertentu berukuran kecil bahkan semuanya dibuat dari aluminium. Kapal-kapal cepat tipe FPB 28 yang dibuat PT PAL INDONESIA umpamanya, terbuat dari tiga jenis bahan utama : 1) aluminium untuk konstruksi melintang, memanjang, dan bangunan atasnya (gading-gading, floor, penumpu tengah dsb.), 2) kayu jati untuk lambung, dan 3) baja untuk pondasi mesin.

Kriteria perancangan secara umum berpijak pada bahan dengan kekuatan dan keuletan yang baik sebagaimana diukur melalui uji tarik baku. Faktor keselamatan kemudian diterapkan untuk menentukan tegangan perancangan yang memberikan margin keselamatan untuk sifat-sifat tarik, luluh, ataupun kelelahan bahan tersebut. Prosedur seperti ini tidak memperhitungkan ancaman kegagalan akibat kepecahan getas (*brittle fracture*) pada baja yang dihubungkan tidak dengan uji keuletan biasanya, namun dengan keuletan akibat beban tiba-tiba dan pada keadaan adanya retak (*notch*).

3.4 PERSYARATAN UTAMA BAHAN KONSTRUKSI KAPAL

Dari sudut pandang perancang struktur, perubahan dan fluktuasi tegangan adalah besaran yang tidak pasti. Modulus elastisitas yang tinggi (tepatnya rasio kekakuan/ berat yang besar) untuk meminimumkan regangan pada tingkat tegangan tertentu dan untuk menunda instabilitas elastis adalah amat penting. Penting dicatat bahwa mudah sekali kita meremehkan bagaimana asumsi benda-kaku dipakai untuk mendekati masalah struktur atau hidromekanika dan bagaimana rumit dan sulitnya penyelesaian masalah ini

apabila kenon-linieran struktur juga diperhitungkan dalam tahapan awal perancangan. Pada kenyataannya, kegagalan gabungan yang rumit dalam bentuk pemindahan beban progresif, yang amat sulit untuk diketahui pada tahap *shake-down* menengah atau lanjut, akan semakin sulit untuk diramalkan bahkan pada tahap awal kegagalan tersebut. Selanjutnya, sambungan-sambungan harus dirancang sedemikian sehingga tidak menjadi daerah yang paling rentan pada saat menerima tarikan, tekan, ataupun geser.

Galangan tentu berminat dengan ketersediaan bahan di pasaran dengan mutu yang konsisten memenuhi persyaratan minimal yang diminta. Bahan tersebut juga harus dapat dengan mudah dibentuk, dipotong, dan disambung tanpa harus kehilangan sifat-sifat mekaniknya. Sementara mutu kerja dan pemeriksaannya juga tidak dapat diabaikan, kenaikan biaya fabrikasi harus dihindari agar tidak menghilangkan keuntungan yang mungkin diperoleh dari penggunaan bahan yang lebih canggih.

Pemilik kapal yang berkepentingan dengan keuntungan pengoperasian kapal amat berkepentingan dengan biaya pembelian kapal. Namun demikian, biaya pemeliharaan yang murah juga penting yang berarti juga ketahanannya terhadap korosi atau keausan. Akhirnya, sebagai alat angkut dengan kendala berat yang ketat, kapal dengan bahan yang rasio kekuatan/beratnya tinggi sehingga meningkatkan muatan atau biaya bahan bakar tentu lebih baik.

3.5 MATERIAL PELAT DAN PROFIL

Semua material (bahan) yang digunakan untuk bagian-bagian struktur yang sesuai dengan peraturan konstruksi dapat mengacu pada peraturan untuk material BKI volume V. Baja struktur lambung adalah baja yang mempunyai nilai *yield* minimal R_{EH} 235 N/mm^2 dan kekuatan putus (*tensile*) 400-490 N/mm^2.Baja strktur lambung dikelompokkan dalam *grade* KI-A,KI-B,KI-D,KI-E, yang mempunyai perbedaaan dalam masing-masing bagian tersebut pada *toughness properties*. Baja struktur lambung dengan tensile lebih tinggi dibagi dalam empat bagian menurut R_{EH} berdasarkan tabel di bawah ini :

Tabel 3.2 Hubungan antara R_{EH} dengan k

R_{EH}	k
265	0,91
315	0,78
355	0,72
390	0,66

Sedangkan pengelompokan berdasarkan *toughness properties* adalah sebagai berikut : KI-A 27 S ; KI-D 27 S ; KI-E 27 S ; KI-A 32/36/40 ; KI-D 32/36/40 ; KI-E 32/36/20 dan KI-F 32/36/40.

Tabel 3.3 Baja Kekuatan Tinggi

Tebal Pelat (mm) / Kelas	< 15 > 15	≤ 20 >20	≤ 25 > 25	≤ 30 > 30	≤ 35 > 35	≤ 40 > 40	≤ 45 > 50	≤ 00
I	A/AH	A/AH	A/AH	A/AH	A/AH	A/AH	D/DH	D/DH[2]
II	A/AH	A/AH	A/AH	A/AH	B/AH	B/AH	D/DH	E/EH
III	A/AH	A/AH	B/AH	D/DH	D/DH	D/DH	E/EH	E/EH
IV	A/AH	B/AH	D/DH	E/DH	E/EH	E/EH	E/EH	E/EH
V	D/DH	E/DH	E/EH	E/EH	E/EH	E/EH	E/EH	E/EH

1. Tebal sesungguhnya dari bagian struktur
2. Untuk tebal t> 60 mm: E/EH

BAB 4
BEBAN PADA STRUKTUR KAPAL

4.1 BEBAN-BEBAN PADA STRUKTUR KAPAL

Beban-beban yang bekerja pada kapal dapat dikelompokkan dalam empat jenis:

a. *Beban-beban statis*, yaitu beban-beban yang berubah hanya apabila berat total kapal berubah, sebagai akibat kegiatan bongkar-muat, pemakaian bahan bakar, atau perubahan pada kapalnya sendiri. Ini terdiri dari:
   1. Berat kapal beserta seluruh isinya;
   2. Gaya tekan ke atas statis saat diam atau bergerak;
   3. Beban-beban suhu (*thermal*) akibat perbedaan suhu non-linier dalam lambung;
   4. Beban-beban terpusat akibat drydocking dan kandas.

b. *Beban-beban dinamis berfrekuensi rendah*, yaitu beban-beban yang berubah besarnya dalam waktu dengan periode merentang dari beberapa detik sampai beberapa menit, dan oleh karena itu terjadi pada frekuensi-frekuensi yang cukup rendah yang bila dibandingkan dengan frekuensi-frekuensi respons getaran lambung dan bagian-bagiannya tidak menyebabkan pembesaran resonansi yang berarti pada tegangan-tegangan yang terjadi pada struktur kapal. Beban-beban ini terutama disebabkan oleh gelombang selama kapal bergerak. Beban-beban ini terdiri dari:
   1. Variasi tekanan pada lambung akibat gelombang;
   2. Variasi tekanan pada lambung akibat gerakan osilatoris kapal;
   3. Reaksi-reaksi inersial akibat percepatan masa kapal beserta isinya.

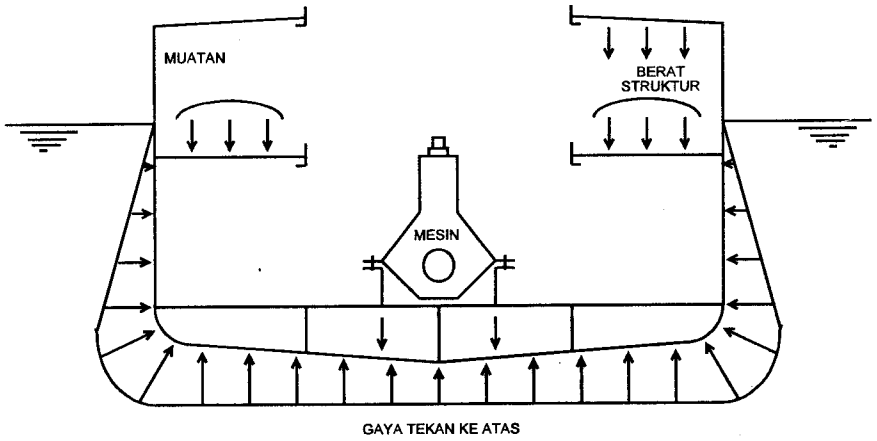
c. *Beban-beban dinamis berfrekuensi tinggi*, yaitu beban-beban yang berubah dalam waktu dengan frekuensi yang cukup tinggi untuk menimbulkan respons getaran pada struktur kapal. Beberapa beban jenis ini mungkin kecil, namun karena pembesaran resonansi, beban-beban ini dapat mengakibatkan tegangan-tegangan dan lendutan-lendutan yang berlebihan. Beban-beban jenis ini terdiri dari :
   1. Beban-beban hidrodinamis pada lambung akibat propeller kapal;
   2. Beban-beban pada lambung kapal akibat permesinan di dalam kapal;
   3. Beban-beban hidroelastis akibat adanya interaksi komponen-komponen tonjolan kapal (kemudi, dsb) dengan aliran fluida di sekeliling kapal;

4. Beban-beban akibat gelombang pendek yang frekuensi pertemuannya sama dengan frekuensi alami moda kecil dari lambung kapal sehingga menimbulkan respons resonansi yang cukup besar –disebut *springing*.

d. *Beban-beban tumbuk*, yaitu beban-beban akibat *slaming* atau pukulan gelombang pada lunas dan lambung haluan, atau bagian lambung lainnya, termasuk pengaruh siraman air di atas geladak. Pada kapal perang, beban-beban akibat tembakan persenjataan merupakan komponen beban tumbuk yang penting. Beban tumbuk ini dapat menimbulkan getaran transient pada lambung yang disebut *whipping*.

4.2 BEBAN STATIS PADA KAPAL TERAPUNG DIAM

Beban-beban ini terdiri dari dua bagian, yaitu :1) gaya tekan ke atas, dan 2) gaya berat (gravitasi) kapal. Gaya tekan ke atas adalah resultan dari distribusi tekanan hidrostatis pada bidang luar lambung kapal yang tercelup. Tekanan ini adalah tekanan permukaan yang arahnya dimana-mana tegak lurus lambung kapal. Namun demikian, gaya tekan ke atas merupakan resultan gaya ke atas yang tegak lurus permukaan air. Gaya berat adalah gaya ke bawah yang tersebar pada seluruh kapal beserta isinya. Gaya-gaya ini dilukiskan secara skematis dalam Gambar 4.1

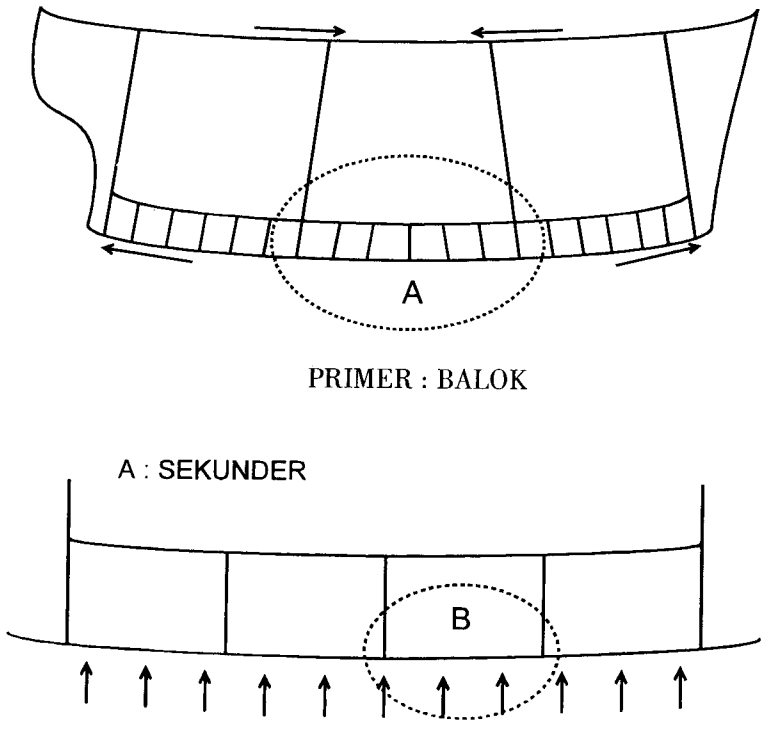


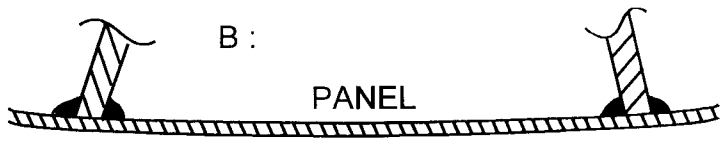
Gambar 4.1 Komponen-komponen Beban Statis pada Lambung Kapal

Tiap-tiap komponen beban dapat mengakibatkan pengaruh yang bersifat lokal atau menyeluruh pada struktur kapal. Mesin utama kapal merupakan beban lokal yang besar pada tempat peletakannya di kapal, dan

fondasinya harus dirancang untuk menyebarkan beban-beban ini secara merata pada struktur lambung kapal. Pada saat yang sama, berat mesin ini menyumbang pada gaya-gaya geser dan momen lengkung yang bekerja pada semua tempat sepanjang kapal. Bila sebagian muatan kapal terdiri dari cairan, misalnya bahan bakar, maka akan timbul gaya tekanan hidrostatis akibat cairan tersebut yang tegak lurus pada sisi-sisi tangki tempat penyimpanan muatan cair tersebut.

Beban-beban tekanan internal ini mungkin menimbulkan pengaruh struktural lokal dan harus diperhitungkan dalam perancangan sekat melintang ataupun komponen-komponen pembatas tangki lainnya. Peletakan geometris dan pola respon lendutan maupun tegangan yang diakibatkan pada struktur kapal adalah sedemikian rupa sehingga pada umumnya memudahkan apabila struktur dan respon tersebut dikelompokkan dalam tiga komponen, yaitu primer, sekunder, dan tertier. Hal ini dilukiskan dalam Gambar 4.2 di halaman berikutnya.





Gambar 4.2 Struktur Primer, Sekunder, dan Tertier

Respon primer adalah respon lambung keseluruhan pada saat mengalami lengkungan (*bending*) dan puntiran (*twisting*) sebagai balok, akibat beban-beban eksternal dalam arah vertikal, horisontal, dan puntiran yang terdistribusi arah memanjang kapal.

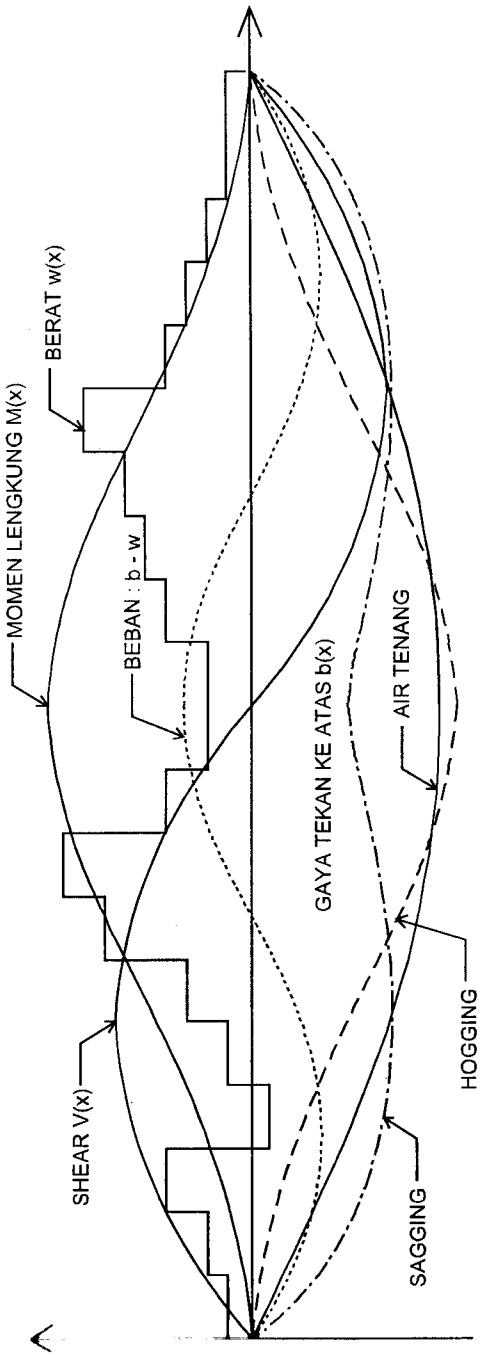
Respon sekunder terdiri dari tegangan dan lendutan pada sebuah panel pelat tunggal berpenegar, misalnya panel struktur alas yang dibatasi oleh dua sekat melintang. Beban pada panel tegak lurus pada bidang panel tersebut dan batas-batas dari panel sekunder ini biasanya dibentuk oleh panel-panel sekunder lainnya, misalnya panel lambung sisi dan panel sekat melintang.

Respon tertier merupakan lendutan di luar bidang dan tegangan-tegangan yang terkait pada sebuah panel pelat tunggal. Beban pada panel pelat ini tegak lurus pada bidang panel, dan batas-batasnya dibentuk oleh penegar-penegar panel sekunder tempat panel pelat tunggal tersebut berada.

Dari gambaran di atas terlihat bahwa kadang-kadang diperlukan untuk mengetahui penyebaran setempat beban-beban yang bekerja, dan dalam kasus-kasus lainnya, bergantung pada respon struktur yang akan dihitung, perlu diketahui penyebaran resultan-resultan dari beban-beban lokal.

Misalnya adalah beban per satuan panjang untuk lambung keseluruhan. Analisa respon primer dilakukan dengan cara menghipotesakan bahwa seluruh lambung kapal berperilaku seperti sebuah balok yang bebannya berasal dari penyebaran berat kapal dan gaya tekan ke atas sepanjang kapal. Seperti pada perhitungan kekuatan balok pada umumnya, diperlukan pertama-tama integrasi beban untuk memperoleh penyebaran memanjang dari gaya lintang (*shear*) total, dan kemudian melakukan integrasi lagi untuk memperoleh penyebaran momen lengkung sepanjang kapal.

Beban-beban di air tenang sangat berpengaruh pada besarnya gaya lintang dan momen lengkung total yang bekerja pada hampir semua kapal. Kemudian, pengaruh gelombang ditambahkan pada penyebaran gaya-gaya lintang dan momen lengkung tersebut. Gambar 4.3 menunjukkan suatu penyebaran memanjang dari berat dan gaya tekan ke atas dari sebuah kapal di air tenang, saat *hogging*, dan *sagging*.



Gambar 4.3 Beban Statis, Gaya Lintang, dan Momen Lengkung

Seperti pada perhitungan kekuatan balok, gaya lintang pada titik x_1, $V(x_1)$, diperoleh dengan mengintegrasikan kurva beban:

$$V(x_1) = \int_0^{x_1} [b(x) - w(x)]dx \qquad (1)$$

dimana $b(x)$ adalah gaya tekan ke atas per satuan panjang, dan $w(x)$ adalah berat per satuan panjang. Momen lengkung pada titik x_1, $M(x_1)$, diperoleh dengan mengintegrasikan kurva gaya lintang $V(x)$:

$$M(x_1) = \int_0^{x_1} V(x)dx \qquad (2)$$

Sampai disini harus dicatat bahwa pembebanan statis pada kapal harus dihitung untuk beberapa distribusi muatan dan komponen berat lainnya yang berbeda untuk memperoleh harga-harga gaya lintang V dan momen lengkung M ekstrem yang kemudian digabungkan pada pembebanan lain. Harga-harga ekstrem ini menjadi pedoman perancangan komponen-komponen struktur kapal. Lebih jauh lagi, harus disadari bahwa pembebanan statis ini akan berubah selama pelayaran. Hal ini disebabkan pemakaian bahan bakar, pemindahan balas, bongkar muat di pelabuhan, dsb.

4.3 BEBAN-BEBAN GELOMBANG

Beban-beban gelombang terutama adalah beban-beban dinamis berfrekuensi rendah, atau beban-beban yang melibatkan gerak kapal dan gerak gelombang yang menghasilkan pembesaran tegangan dinamis yang dapat menghasilkan pembesaran tegangan dinamis yang dapat diabaikan. Setelah beban-beban ini diperlakukan sebagai beban yang kuasi-statis, respon-respon struktur seperti tegangan dan lendutan dapat dihitung dengan memakai metode-metode analisa struktur.

Paling tidak terdapat empat prosedur yang berbeda kecanggihannya yang dapat dipakai untuk menaksir beban-beban ini serta gaya lintang dan momen lengkung yang ditimbulkannya, yaitu : 1) metode pendekatan, 2) pengukuran langsung pada kapal, 3) pengukuran beban pada model kapal di laboratorium, dan 4) perhitungan langsung berdasar pada teori hidrodinamika. Dalam buku ini, hanya akan dibahas metode pendekatan.

Dalam proses *preliminary design*, seringkali diinginkan adanya taksiran awal beban struktur lambung dengan memakai metode-metode pendekatan, bahkan sebelum informasi rinci mengenai distribusi berat kapal dan bentuk

lambung kapal tersedia. Metode-metode ini menggunakan perumusan semi-empiris dan perhitungan kuasi-statis.

Misalkan *American Bureu of Shipping* (1987) menaksir besarnya momen lengkung akibat gelombang, dalam hubungannnya dengan momen lengkung di air tenang untuk dipakai dalam menentukan modulus penampang yang diperlukan strukur kapal adalah sebagai berikut:

$$M_w = C_2 L^2 B H K_b \qquad (3)$$

Dimana C_2 dan K_b adalah koefisien-koefisien yang telah ditabulasikan dan besarnya bergantung pada koefisien blok kapal; L dan B adalah panjang dan lebar kapal; H adalah tinggi gelombang, atau koefisien momen lengkung yang bergantung pada L.

Harga H membesar sesuai dengan pertambahan L, dan menjadi konstan pada harga $L = 305$ m. Semua konstanta dalam Persamaan (3) didasarkan pada data ekstensif yang diperoleh dari sejumlah besar data kapal digabung dengan perhitungan, uji model, dan pengukuran skala penuh.

4.4 EVALUASI DETERMINISTIK BEBAN GELOMBANG

Perhitungan momen lengkung, gaya lintang, dan beban torsional akibat gelombang mensyaratkan pengetahuan atas distribusi gaya-gaya fluida yang berubah terhadap waktu yang bekerja pada permukaan basah lambung bersama-sama dengan distribusi beban-beban reaksi internal. Beban-beban fluida tersebut bergantung pada gerakan masa air akibat adanya gelombang dan gerakan kapalnya sendiri. Beban-beban inersial sama dengan hasil kali masa lokal kapal dan percepatan absolut lokal.

Gaya lintang dan momen lengkung selanjutnya diperoleh pada waktu-waktu yang diinginkan dengan menghitung integral pertama dan kedua dari gaya per satuan panjang horisontal atau vertikal bersih yang tersebar memanjang kapal. Hal ini sama persis dengan perhitungan untuk di air tenang, dengan suku gaya tekan ke atas diganti oleh gaya fluida per satuan panjang yang berubah terhadap waktu, sementara suku berat kapal diganti oleh gaya per satuan panjang reaksi inersial. Hasilnya kemudian dijumlahkan secara aljabar dengan harga-harga yang diperoleh untuk kondisi di air tenang.

Sebagaimana telah diketahui, perhitungan beban-beban inersial dan sebagian dari beban-beban fluida mensyaratkan bahwa gerakan kapal akibat gelombang diketahui terlebih dahulu. Penyelesaian untuk gerakan kapal dan sistem beban fluidanya saat ini umumnya dilakukan dengan sebuah prosedur yang berpijak pada teori Pias (*strip theory*).

Ciri-ciri utama teori Pias akan dibahas secara ringkas berikut ini. Untuk penyederhanaan, hanya komponen bebas vertikal yang bekerja pada kapal yang bergerak maju pada *head sea* regular yang akan dibahas disini. Karena simetri terhadap bidang vertikal memanjang kapal dan gelombang, gerakan-gerakan dan beban-beban hanya memiliki komponen-komponen pada bidang ini. Pada setiap saat, gerakan kapal akan terdiri dari gerakan-gerakan yang berubah terhadap waktu *pitch*, *heave*, dan *surge* yang dihimpitkan pada kecepatan maju rata-rata.

Salah satu asumsi penting dalam teori Pias linier adalah bahwa baik amplitudo gelombang maupun gerakan kapal adalah kecil. Sebagai hasilnya, dimungkinkan untuk menganggap bahwa gaya vertikal sesaat total pada sebuah pias melintang tipis sepanjang dx, terdiri dari jumlah aljabar beberapa suku yang dihitung secara terpisah. Dua dari gaya-gaya elementer ini adalah gaya tekan ke atas di air tenang dan berat dari elemen panjang kapal. Keduanya adalah gaya-gaya yang sama untuk perhitungan beban di air tenang.

Gaya-gaya yang berubah terhadap waktu yang masih tersisa merupakan reaksi-reaksi inersial dan tekanan air yang berkaitan dengan gelombang dan gerakan kapal akibat gelombang. Gaya-gaya kekentalan, yang secara relatif kurang penting (kecuali untuk perhitungan peredam rolling) diabaikan dalam perhitungan gaya-gaya vertikal ini.

4.5 TAKSIRAN PROBABILISTIK ATAS BEBAN GELOMBANG

Menimbang ketidakpastian yang melekat pada lingkungan laut, analisa statistik, yang ditunjang oleh percobaan model, kini merupakan bagian yang diterima dan penting dalam proses evaluasi besarnya momen lengkung dan beban-beban lainnya pada sebuah kapal di laut.

Dalam kerangka teori gerak kapal linier, komponen beban lambung akibat gelombang, termasuk tekanan pada sebuah titik pada permukaan lambung, beban hidrodinamis per satuan panjang, beban inersial per satuan panjang, gaya lintang dan momen lengkung semuanya berbanding lurus terhadap amplitudo gelombang; sehingga prinsip-prinsip superposisi dapat diberlakukan.

Besaran-besaran statistik yang perlu diketahui dalam perhitungan kekuatan kapal dibagi dalam tiga kelompok :

1) harga rata-rata dan ekstrem jangka pendek;
2) harga rata-rata dan ekstrem jangka panjang;
3) harga siklik kumulatif.

Kriteria jangka pendek merujuk pada suatu periode waktu kira-kira satu sampai empat jam. Selama periode ini kondisi laut (*sea state*) dapat dikatakan uniform (artinya, secara statistik stasioner) dalam kondisi cuaca normal.

Perkiraan harga-harga ekstrem berjangka pendek dapat dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu :

1) peluang pelampauan (*exceedance probability*), dan
2) teori harga ekstrem.

Taksiran dengan memakai peluang pelampauan adalah lebih sederhana, karena apabila kita mengetahui fungsi kepadatan peluang (*probability density function*, p.d.f.) dari beban, fungsi ini dapat diintegrasikan untuk memperoleh peluang dilampauinya beberapa tingkat beban yang berbeda-beda, yaitu harga beban yang kita harapkan akan dilampaui sekali dalam jumlah siklus beban tertentu.

Namun demikian, jika fungsi kepadatan peluang tersebut diketahui, kita dapat juga memakai prinsip-prinsip teori harga ekstrem formal untuk memperoleh harga puncak yang kita harapkan dalam jumlah siklus beban tertentu. Harga-harga yang diperoleh dengan dua pendekatan ini pada dasarnya adalah sama.

Kriteria jangka panjang merujuk pada periode waktu yang lebih lama, dihitung dalam waktu hari atau tahun. Selama periode ini, kondisi laut dapat berubah secara sangat berbeda dari keadaan tenang sampai kondisi topan, namun kecepatan perubahan kondisi ini cukup rendah sehingga asumsi uniformitas merupakan pendekatan yang cukup baik untuk kurun waktu beberapa jam. Dengan demikian, respon jangka panjang dapat dianggap sebagai akumulasi respon-respon jangka pendek terhadap kondisi laut yang berbeda-beda, masing-masing secara statistik dianggap stasioner. Kumpulan respon-respon jangka pendek ini akan berlangsung, untuk kapal ataupun bangunan laut lainnya, selama suatu periode waktu yang sama dengan umur operasi selama 20 sampai 30 tahun.

Beban jenis ketiga merujuk pada suatu fenomena pembebanan siklis berjangka panjang yang dapat mengakibatkan kegagalan *fatigue* (kelelahan) pada struktur. Dalam hal ini, sejumlah besar siklus pembebanan momen lengkung dan tegangan pada tingkat rendah atau sedang dapat menyebabkan kegagalan yang sama besarnya sebagaimana tegangan ekstrem pada tingkat tinggi.

BAB 5
ANALISA RESPON STRUKTUR KAPAL

5.1 FITRAH REAKSI-REAKSI STRUKTURAL KAPAL

Reaksi komponen struktural lambung kapal terhadap beban-beban eksternal lazim diukur dengan besarnya tegangan ataupun lendutan yang terjadi. Kriteria kinerja struktural dan analisa yang melibatkan tegangan biasa disebut kekuatan (*strength*), sementara pertimbangan lendutan disebut kekakuan (*stiffness*). Kemampuan sebuah struktur untuk menyangga beban yang diterima dapat diukur dari segi kekuatan ataupun kekakuan, ataupun kedua-duanya sekaligus. Kekuatan komponen struktur dikatakan tidak memadai atau kegagalan struktur dikatakan telah terjadi apabila material struktur telah kehilangan kemampuan menopang beban melalui kepecahan, luluh, tekuk (*buckling*) atau mekanisme kegagalan lainnya dalam menghadapi beban-beban eksternal.

Lendutan yang berlebihan, dapat juga mengurangi kehasilgunaan sebuah komponen struktur, sekalipun kegagalan bahan tidak terjadi, apabila lendutan tersebut mengakibatkan *misalignment* (ketidaklurusan), atau lendutan geometrik lain pada komponen vital permesinan kapal atau peralatan navigasi, dan persenjataannya, sehingga kapal sebagai sebuah sistem menjadi tidak berhasil guna lagi.

Analisa respon struktur kapal akan dipermudah dengan mengelompokkan respon struktur tersebut secara logis menurut geometri struktur, fitrah beban, dan responnya. Seperti telah disinggung sebelumnya, salah satu ciri penting struktur kapal adalah komposisinya yang tersusun dari panel-panel pelat berpenegar. Beban-beban yang bekerja pada panel-panel seperti ini mungkin memiliki komponen-komponen yang sebidang dengan pelatnya, dan komponen yang tegak-lurus bidang pelat. Komponen-komponen yang tegak lurus berasal dari pembebanan sekunder akibat adanya tekanan fluida dari air yang melingkupi panel tersebut, atau dari cairan internal di dalam tangki-tangki, atau dari berat muatan, dan berat komponen struktur itu sendiri.

Pembebanan sebidang pada komponen-komponen struktur memanjang kapal berasal dari puntiran dan lengkungan eksternal primer dari lambung kapal keseluruhan. Contoh terjelas dari pembebanan sebidang ini adalah tegangan tarik atau tekan pada geladak atau alas akibat kelengkungan lambung kapal sebagai respon terhadap adanya distribusi berat dan gaya tekan ke atas sepanjang badan kapal saat diam, saat hogging, dan saat sagging.

Pembebanan sebidang pada komponen-komponen melintang kapal seperti sekat melintang kapal berasal dari beban-beban tepi yang diteruskan ke komponen-komponen ini oleh panel pelat berpenegar sisi lambung kapal dan berat yang diteruskan ke komponen-komponen tersebut oleh panel-panel geladak. Beban-beban sebidang juga diakibatkan oleh lengkungan lokal komponen panel berpenegar.

Sebagai contoh, sebuah panel pelat alas berpenegar yang dibatasi oleh dua sekat melintang mengalami kombinasi lengkungan memanjang dan melintang sebagai respon terhadap tekanan fluida yang bekerja pada panel alas tersebut. Lengkungan panel ini selanjutnya menyebabkan tegangan pada bidang pelat dan pada bilah-bilah hadap (*flanges*) penegar. Akhirnya, panel-panel pelat individual yang dibatasi sepasang penegar mengalami lengkungan keluar dari bidang awal sebelum terdeformasi sebagai respon terhadap beban tekanan fluida yang tegak lurus bidang pelatnya. Ini mengakibatkan tegangan lengkung yang sejajar dengan bidang plat, dan besarnya tegangan ini berbeda-beda sepanjang tebal pelat.

Untuk melakukan analisa atas respon struktur pada suatu bagian kapal, diperlukan tiga jenis informasi yang menyangkut komponen struktur tersebut:

1. ukuran, tataletak, dan sifat-sifat mekanik bahan komponen tersebut;
2. kondisi batas komponen, yaitu derajat kekakuan sambungan komponen ke komponen yang bersebelahan;
3. beban yang bekerja.

Secara prinsip, kita dapat melakukan analisa berbasis komputer, seperti dengan metode elemen hingga, untuk melakukan analisa lambung secara keseluruhan sekaligus tanpa melakukan pembagian atas kapal menjadi beberapa komponen sederhana. Namun demikian, paling tidak ada dua alasan untuk mempertahankan pendekatan komponen, yaitu :

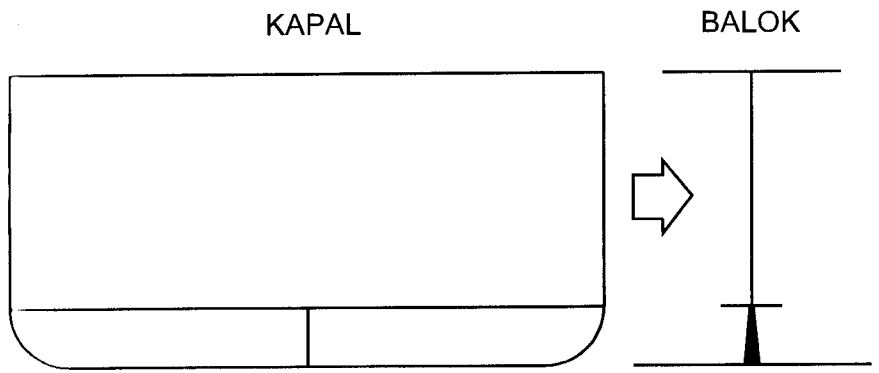
1. Dengan memperhatikan perilaku struktural dari komponen-komponen struktur individual dan interaksinya satu dengan yang lain, diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai fungsi-fungsi komponen tersebut, dan ini mengantarkan kita pada rancangan yang lebih baik;
2. Banyak persoalan yang dihadapi oleh seorang naval architect melibatkan perancangan atau perubahan hanya pada sebagian kecil struktur kapal, sehingga suatu analisa menyeluruh merupakan hal yang tidak perlu atau tidak dapat dibenarkan secara ekonomis.

Resultan tegangan pada titik tertentu di kapal terdiri dari beberapa bagian, masing-masing ditimbulkan oleh sebab-sebab yang berbeda. Dalam banyak hal, jarang sekali terdapat interaksi diantara tiga komponen (primer, sekunder, dan tersier) tegangan atau lendutan, dan setiap komponen kemudian dapat dihitung dengan memakai metode atau pertimbangan secara terpisah. Dalam kasus seperti ini, resultan tegangan diperoleh dengan superposisi sederhana atas ketiga komponen tegangan tersebut. Sebuah perkecualian terjadi apabila lendutan pelat (*tertier*) jauh lebih besar dibanding tebal pelat. Dalam hal ini tegangan primer dan sekunder akan berinteraksi dengan lendutan tertier dan tegangan yang diakibatkannya, sehingga superposisi sederhana tidak dapat diberlakukan untuk memperoleh resultan tegangan keseluruhan. Untunglah bahwa kasus-kasus seperti ini jarang terjadi pada kapal, sehingga superposisi sederhana dalam banyak hal sahih dipakai.

5.2 TEGANGAN LANGSUNG PRIMER

Perhitungan tegangan langsung primer pada struktur kapal dapat didekati secara cukup realistis dengan konsep balok ekuivalen. Ini telah dilakukan oleh Pietzer yang secara intuitif telah memandang kapal di atas gelombang sebagai balok, sementara Atwood mengubah penampang melintang kapal yang cukup kompleks sebagai sebuah balok dengan beberapa flanges.

Gambar 5.1 secara jelas mengungkapkan tegangan-tegangan yang terjadi pada geladak, alas, dan lambung sisi kapal, dan sekaligus memisahkan komponen-komponen melintang seperti gading dan sekat melintang yang tidak berperan langsung dalam kekuatan memanjang kapal. Sekalipun lambung kapal sama sekali tidak dapat dikatakan sebagai balok prismatik, idealisasi distribusi tegangan struktur kapal menjadi sebuah balok sederhana dapat dipakai untuk memperkirakan respon-respon primer pada seluruh panjang kapal.



Gambar 5.1 Balok Ekuivalen

Komponen struktur kapal yang dipakai dalam perhitungan tegangan primer, sebagian besar mencakup komponen-komponen menerus memanjang seperti geladak, pelat sisi dan pelat alas, sekat memanjang, dan penumpu-penumpu serta penegar-penegar memanjang. Tegangan primer juga mencakup tegangan sebidang pada sekat-sekat melintang akibat berat dan gaya lintang yang disalurkan lewat sekat tersebut oleh geladak, pelat alas, pelat sisi yang bersebelahan.

Penurunan persamaan-persamaan tegangan dan lendutan dengan teori balok elementer (balok Bernoulli-Euler) dapat diperoleh dari banyak buku mengenai kekuatan bahan, dan di sini akan dibahas secara ringkas. Hasil terpenting dalam kerangka perhitungan kekuatan adalah hubungan antara tegangan memanjang kapal σ_x yang bekerja di bidang pelat dengan momen lengkung yang bekerja di sebuah titik (x,z) pada panjang kapal $M(x)$:

$$\sigma_x = -\frac{M(x)z}{I} \tag{1}$$

Dimana z adalah jarak meninggi titik yang ditinjau pada x, dan I adalah momen inersia keseluruhan penampang melintang struktur kapal di titik x dihitung terhadap sumbu netral melintang kapal tempat titik berat keseluruhan penampang melintang kapal tersebut berada.

Jelas, bahwa tegangan-tegangan ekstrem terjadi pada serat teratas atau terbawah pada balok, yaitu saat z memiliki harga-harganya yang terbesar z_{max}. Besaran I/z_{max} disebut modulus penampang balok di titik x (tepatnya bidang melintang yang melalui titik x) SM. Dengan demikian, tegangan maksimum pada geladak, misalnya, diperoleh dari:

$$\sigma_{deck} = -\frac{M(x)}{SM_{deck}} \tag{2}$$

Tanda pada tegangan, pada kondisi tarik atau tekan, ditentukan oleh tanda z. Untuk momen lengkung positif, geladak mengalami tekan dan alas mengalami tarik.

Dua perubahan pada persamaan balok di atas dapat terjadi pada kapal. Yang pertama terjadi apabila struktur kapal terbuat dari beberapa bahan dengan modulus elastisitas E yang berbeda-beda, misalnya, baja dan aluminium. Dalam hal ini, kekakuan fleksural EI harus diganti dengan:

$$\int_A E = (z)z^2 dA$$

di mana A adalah luas penampang, $E(z)$ adalah modulus elastisitas sebuah elemen luas dA yang berada pada jarak z dari sumbu netral. Sumbu netral terletak pada sebuah bidang sedemikian sehingga:

$$\int_A E(z)z\,dA = 0 \tag{3}$$

Yang kedua terjadi pada komponen kekuatan memanjang yang terdiri dari sebuah pelat tipis berpenegar melintang. Misalnya adalah bagian dari sebuah struktur geladak dalam sebuah kapal dengan sistem konstruksi melintang (tanpa penegar-penegar memanjang pada panel-panel pelatnya).

Pada komponen struktur seperti ini, akan timbul juga regangan melintang ε_y bersama-sama dengan regangan memanjang ε_x akibat σ_x. Apabila tepi-tepi pelat dapat bebas bergerak, maka besarnya $\varepsilon_y/\varepsilon_x = \upsilon$, yaitu angka poison, sebesar 0,3 untuk baja. Namun dengan adanya penegar-penegar melintang (gading-gading), besarnya regangan melintang ε_y sedikit mengecil karena adanya pembatas-pembatas penegar melintang tersebut,sehingga timbul tegangan-tegangan dengan arah berlawanan pada pelat dan penegar melintang tersebut.

Pada daerah pelat penegar, besar regangan pada sambungan antara pelat dan penegar dapat dianggap sama. Apabila jarak antar gading-gading melintang ini kecil, asumsi ini dapat diberlakukan pada keseluruhan medan pelat. Prosedur ini sering disebut *smearing* atas pengaruh adanya gading-gading. Gading-gadingnya sendiri dianggap sebagai sebuah komponen elastis satu dimensi.

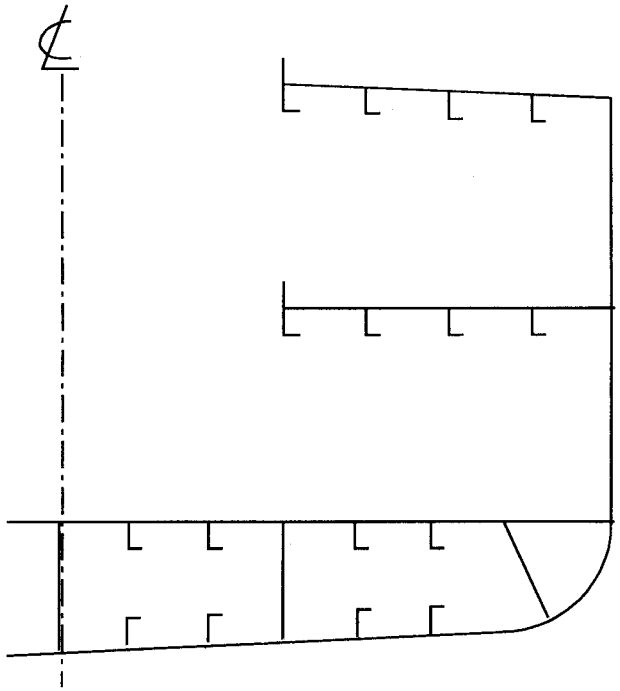
Dengan demikian, sekalipun seluruh penampang tersusun oleh material dengan E yang sama, penampang tersebut berperilaku seperti sebuah penampang komposit apabila ukuran gading dan atau jarak antar gading berbeda-beda pada penampang tersebut.

5.3 PERHITUNGAN MODULUS PENAMPANG

Sebuah langkah penting dalam kegiatan perancangan kapal yang rutin adalah perhitungan modulus penampang (melintang) struktur kapal. Secara prinsip, modulus penampang melintang struktur kapal terhadap geladak atau alas kapal diperoleh dengan membagi momen inersia struktur penampang kapal tersebut dengan jarak dari sumbu netral ke garis geladak atau garis alas. (Perhatikan Gambar 5.2)

Secara umum komponen-komponen berikut dimasukkan dalam perhitungan modulus penampang, apabila komponen-komponen tersebut memanjang kapal secara efektif:

1. Pelat geladak (geladak kekuatan atau geladak-geladak lain yang efektif);
2. Pelat sisi lambung dan pelat alas dalam;
3. Penumpu-penumpu geladak dan alas;
4. Pelat dan penegar-penegar memanjang pada sekat memanjang;
5. Semua pembujur (penegar memanjang) pada geladak, sisi, dan alas dalam;
6. Ambang palkah memanjang yang menerus.



Gambar 5.2 Penampang Melintang Tengah Kapal

Bagaimana sebuah komponen struktur disebut efektif memang masih merupakan isu yang dapat diperdebatkan. Namun, secara umum dapat dikatakan, apabila panjangnya tidak kurang dari 60 % panjang kapal dan menerus, maka komponen tersebut dapat disebut efektif.

Dalam banyak bagian struktur kapal, tegangan memanjang σ_x adalah tegangan yang paling dominan. Namun demikian, pada beberapa tempat tertentu, komponen-komponen tegangan geser menjadi penting, dan dalam situasi-situasi khusus komponen tegangan melintang juga menjadi penting. Sebuah prosedur yang sesuai untuk menaksir komponen-komponen tegangan ini diturunkan dengan menggunakan persamaan-persamaan kesetimbangan statis dari sebuah elemen pelat.

5.4 SHEAR LAG DAN LEBAR EFEKTIF

Dalam banyak komponen struktur kapal, beban disangga, pada tingkat lokal, oleh komponen-komponen jenis-web sebelum diubah menjadi sebuah beban lengkung balok. Sebuah ilustrasi sederhana adalah sebuah penumpu memanjang dengan flange lebar yang menyangga sebuah beban terpusat. Pada tingkat lokal, beban ini pertama-tama diteruskan ke bagian-web dari penumpu memanjang tersebut (dengan demikian beban ini ditahan oleh shear vertikal pada web tersebut).

Sebagai akibat dari beban terpusat ini, maka web ini cenderung untuk melengkung, sehingga terjadi regangan tekan pada tepi atas dan regangan tarik pada tepi bawahnya. Sementara ini flange-flangenya juga mengalami regangan yang sama pada sambungan antara web dan flange, sehingga mengakibatkan adanya beban geser pada setiap tepi flange.

Contoh lain adalah lambung kapal sebagai suatu penumpu memanjang. Tekanan air di dasar alas ditahan secara lokal oleh pelat yang meneruskan tekanan ini ke floor-floor dan gading-gading melintang disekelilingnya. Beban-beban ini kemudian diteruskan secara langsung ke sisi lambung oleh setiap gading secara individual. Dengan demikian, gaya-gaya tekanan air, dan gaya-gaya berat akhirnya diteruskan ke lambung sisi atau web vertikal dari penumpu memanjang kapal sebagai beban-beban geser terkonsentrasi pada setiap sekat atau gading melintang. Kecenderungan melengkung dari lambung sisi dan beban geser pada pelat geladak memiliki perilaku yang serupa dengan contoh pertama.

Sebuah efek penting dari beban geser tepi pada sebuah komponen pelat adalah terjadinya perubahan non-linier pada penyebaran tegangan memanjang. Gejala ini disebut shear lag. Hal ini bertentangan dengan penyebaran merata yang diramalkan terjadi pada flange-flange balok berdasarkan teori balok sederhana. Dalam banyak kasus praktis, perbedaan harga ini kecil. Namun dalam kondisi kombinasi beban dan geometri struktur tertentu, shear lag ini harus diperhatikan. Untuk itu diperkenalkan konsep lebar efektif, yaitu lebar pelat yang sudah direduksi, yang jika diberi beban tegangan merata sepanjang lebarnya akan mampu menahan beban total yang sama oleh beban tegangan tak merata.

Pengaruh shear lag pada kapal adalah mengubah penyebaran tegangan, di geladak misalnya, menjadi tidak merata sepanjang lebar kapal. Tegangan memanjang pada tepi tepi lebar kapal menjadi lebih besar dari yang diperkirakan dengan teori balok sederhana, sementara pada *centreline* justru lebih kecil.

MILIK

5.5 MOMEN LENGKUNG LATERAL DAN PENGARUH TORSIONAL

Pada saat kapal bergerak memotong gelombang, di samping mengalami beban-beban vertikal, kapal juga mengalami beban-beban puntir. Respon kapal terhadap beban puntir ini dapat dikatagorikan sebagai respon primer.

Dalam struktur kapal, telah diketahui bahwa efek-efek torsional seperti tegangan dan lendutan seringkali amat penting diperhatikan pada kapal-kapal yang memiliki bukaan geladak yang lebar, seperti pada kapal kontainer modern. Pengalaman dana perancangan kapal-kapal dengan bukaan geladak yang lebar seperti ini telah menunjukkan bahwa tegangan-tegangan torsional saja memang tidak begitu berbahaya.

Namun apabila ditinjau bersama-sama dengan tegangan-tegangan lengkung primer, keduanya dapat menyebabkan timbulnya primer gabungan. Sebuah masalah struktural yang lebih serius, yang membutuhkan perhatian khusus dalam perancangan kapal-kapal seperti ini, terjadi pada daerah transisi dari penampang terbuka yang lemah secara torsional ke penampang tertutup yang secara relatif lebih kaku yang dibutuhkan untuk memberikan kekakuan torsional pada lambung kapal.

Perubahan mendadak pada karakteristik struktural ini mungkin akan menyebabkan konsentrasi tegangan yang tinggi yang selanjutnya membutuhkan perhatian pada detail rancangan strukturnya. Tujuan utama perancangan dalam kasus ini adalah pemilihan material dan detail struktural yang sesuai untuk daerah-daerah dengan konsentrasi tegangan yang tinggi.

Ketahanan terhadap puntiran dari sebuah penampang terbuka sama sekali dapat diperkirakan dengan persamaan torsi St. Venant sebagai berikut:

$$M_T = GJ\frac{d\theta}{dx} \tag{4}$$

dimana $d\theta/dx$ adalah sudut puntir per satuan panjang; G adalah modulus geser bahan; J adalah tetapan torsional dari penampang. Untuk sebuah penampang terbuka berdinding tipis, tetapan torsional J adalah sebagai berikut:

$$J = \frac{1}{3}\int_0^s t^3 ds \tag{5}$$

Apabila struktur tersebut memiliki juga ketahanan terhadap warping (lendutan relatif dalam arah memanjang antara sisi-sisi bebas dalam penampang yang terbuka), maka sebuah komponen kekakuan torsional lain akan terbentuk akibat adanya tegangan geser sebagai akibat adanya hambatan terhadap warping tersebut. Komponen ini kemudian ditambahkan pada torsi yang dihitung dalam Persamaan 4 di atas.

Dalam struktur kapal, ketahanan terhadap warping diperoleh dari :

1. Penampang-penampang tertutup di antara bukaan-bukaan palkah;
2. Ujung-ujung kapal yang tertutup;
3. Sekat-sekat melintang berdinding ganda;
4. Bagian-bagian penampang yang tertutup dan kaku secara torsional (termasuk dasar ganda).

5.6 RESPON-RESPON STRUKTUR SEKUNDER

Dalam perhitungan respon-respon sekunder, tujuan utamanya adalah menentukan penyebaran baik pembebanan dalam bidang ataupun yang tegak lurus bidang panel pelat berpenegar, serta lendutan dan tegangan pada panjang dan lebar panel tersebut. Dengan demikian, respon sekunder ini merupakan masalah dua dimensi, sementara respon primer dapat dikatakan sebagai satu dimensi.

Sebuah struktur panel, umumnya terdiri dari sebuah pelat datar atau lengkung yang diperkaku dengan suatu sistem penegar. Sistem penegar ini dapat berupa dua himpunan penegar yang diletakkan tegak lurus satu sama lain. Himpunan yang satu umumnya terdiri dari penegar degan ukuran yang sama dan diletakkan dalam satu arah sejajar dengan jarak antar penegar yang sama. Himpunan penegar yang tegak lurus pada himpunan yang pertama, biasanya juga memiliki ukuran dan jarak antar penegar yang sama, namun berbeda dengan himpunan yang pertama. Dalam beberapa kasus, penegar yang ditengah dibuat agak lebih besar daripada yang lain. Dalam beberapa kasus lain, sistem penegaran yang ada mungkin hanya ada untuk satu arah tertentu saja.

Secara garis besar, penyelesaian untuk tegangan dan lendutan pada panel sekunder ini dapat dianggap sebagai sebuah penyelesaian bagi respon dari sebuah sistem balok yang saling berpotongan secara ortogonal. Interaksi antara kedua sistem balok tersebut disebabkan adanya hubungan fisik antar penegar yang mensyaratkan kesamaaan lendutan dari kedua sistem balok tersebut pada titik-titik perpotongannya.

Sebuah interaksi jenis kedua timbul akibat adanya pola tegangan dua-dimensi dalam pelat yang dapat dianggap sebagai bagian dari flange penegar-penegar yang melekat pada pelat tersebut. Pengaruh kekakuan pelat pada kekuatan lengkung balok ditimbulkan oleh tegangan memanjang langsung

dalam pelat yang bersebelahan dengan penegar, kemudian diubah oleh efek-efek tegangan melintang, dan juga akibat tegangan geser dalam bidang pelat. Tegangan sekunder maksimum dapat ditemukan dalam pelat itu sendiri, namun seringkali ditemukan dalam flange-flange bebas penegar penegar tersebut, karena flange-flange ini berada dalam jarak yang lebih jauh daripada komponen pelat dari sumbu netral gabungan pelat-penegar.

Paling tidak terdapat empat prosedur yang berbeda untuk menaksir perilaku struktural panel pelat berpenegar yang diberi beban tegak lurus panel, masing-masing dengan asumsi-asumsi penyederhanaan tertentu, yaitu 1) teori pelat ortotropik, 2) teori balok pada tumpuan elastis, 3) teori grilalge, 4) metode elemen hingga.

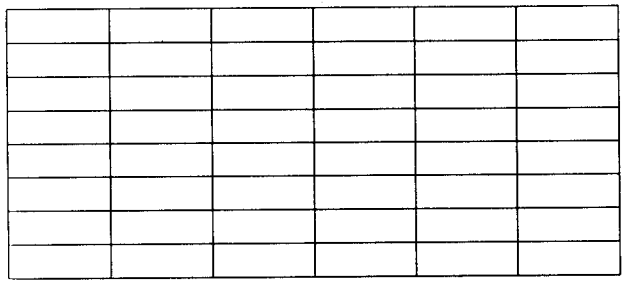
Untuk kebutuhan perhitungan manual, diagram perancangan yang dikembangkan oleh Schade (Gambar 5.4 dan 5.5) berpijak pada teori pelat ortotropik, barangkali merupakan prosedur perhitungan yang paling praktis.

Teori pelat ortotropik merujuk pada teori kelengkungan pelat yang memiliki kekakuan fleksural yang berbeda dalam dua arah yang saling tegak lurus. Dalam menerapkan teori ini pada panel pelat dengan sebuah sistem penegaran tertentu, struktur panel pelat ini diidealisasikan dengan menganggap bahwa sifat-sifat struktural sistem penegaran tersebut dapat didekati dengan harga rata-ratanya yang dianggap tersebar secara merata sepanjang lebar atau panjang panel pelat. Lendutan-lendutan dan tegangan-tegangan dalam struktur "menerus" ini kemudian diperoleh dari penyelesaian persamaan lendutan pelat ortotropik. Paling tidak terdapat empat jenis sistem penegaran (Gambar 5.3) , yaitu:

1. Jenis A : satu kelompok penegar dalam satu arah dan satu kelompok penegar lain dalam arah tegak lurus kelompok pertama;
2. Jenis B : beberapa penegar dalam satu arah, dan satu penegar tengah dalam arah tegak lurus;
3. Jenis C : satu kelompok penegar dalam satu arah saja;
4. Jenis D : pelat tanpa penegar.

Selanjutnya, paling tidak terdapat empat kasus tumpuan pada sisi-sisi panel pelat berpenegar tersebut:

1. Kasus 1 : keempat sisi pelat ditumpu sederhana;
2. Kasus 2 : dua sisi pendek dijepit, kedua sisi panjang ditumpu sederhana;
3. Kasus 3 : dua sisi panjang dijepit, kedua sisi pendek ditumpu sederhana;
4. Kasus 4 : keempat sisi panel dijepit.



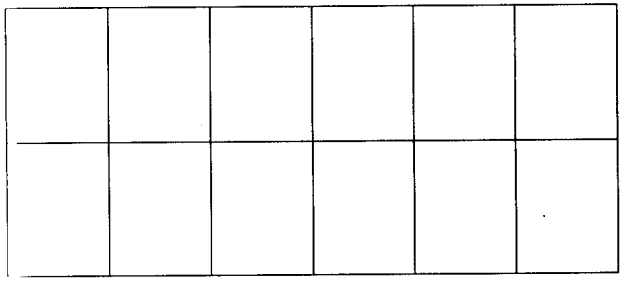
$$i_a = \frac{I_{na}}{s_a} + 2\left(\frac{I_a - I_{na}}{b}\right)$$

$$i_b = \frac{I_{nb}}{s_b} + 2\left(\frac{I_b - I_{nb}}{a}\right)$$

$$\rho = \frac{a}{b} + \sqrt[4]{\frac{i_b}{i_a}}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{I_{pa}}{I_{na}}\frac{I_{pb}}{I_{nb}}}$$

Sistem Penegaran Tipe A



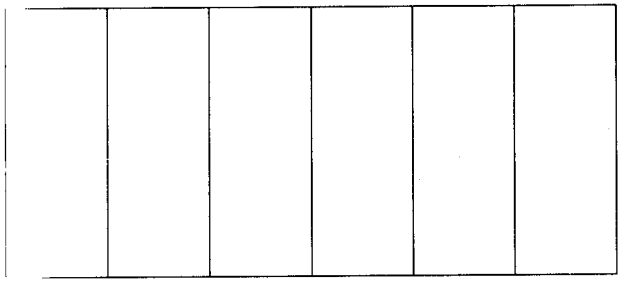
$$i_a = 2\frac{I_a}{b}$$

$$i_b = \frac{I_{nb}}{S_b} + 2\left(\frac{I_b - I_{nb}}{a}\right.$$

$$\rho = \frac{a}{b}\sqrt{\frac{i_b}{i_a}}$$

$$\eta = 0.124\sqrt{\frac{I^2_{pb}}{I_a I_{nb}}\frac{b}{S_b}}$$

Sistem Penegaran Tipe B



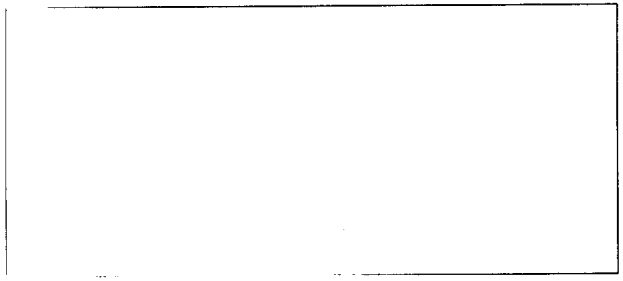
$$i_a = 0$$

$$i_b = \frac{I_{nb}}{S_b}$$

$$\rho = \infty$$

$$\eta = \textit{tidakterdifinisi}$$

Sistem Penegaran Tipe C



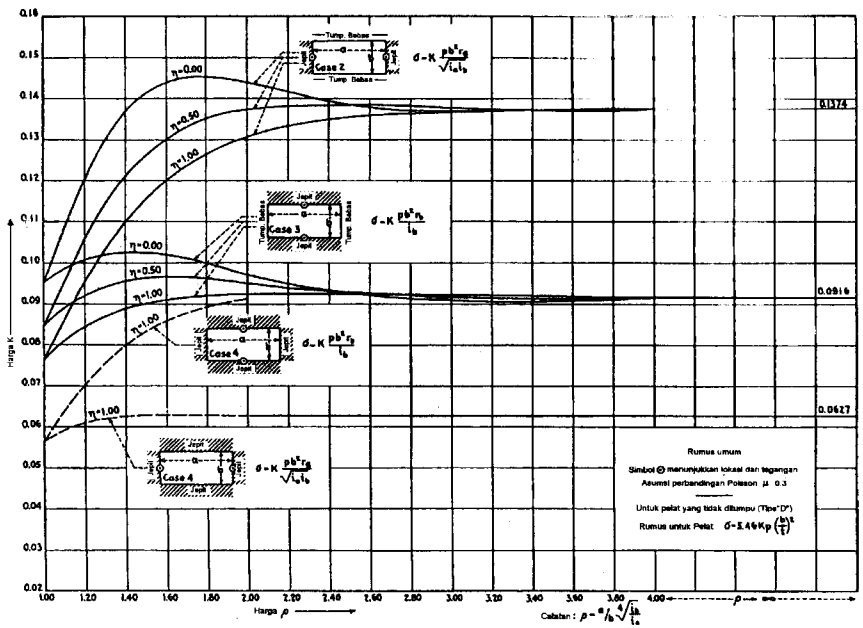
$$I_a = I_b = \frac{t^2}{12\left(1-\mu^2\right)}$$

$$\rho = \frac{a}{b}$$

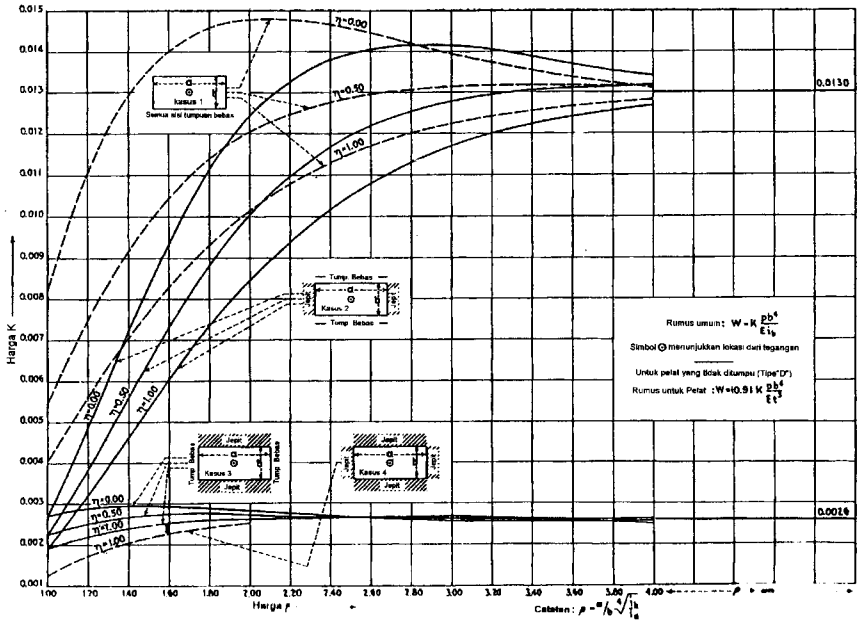
$$\eta = 1.0$$

Sistem Penegaran Tipe D

Gambar 5.4 Tipe-Tipe Sistem Penegaran



Gambar 5.4 Tegangan Bending dalam Panel Pelat



Gambar 5.5 Defleksi Pelat pada Tengah Panel

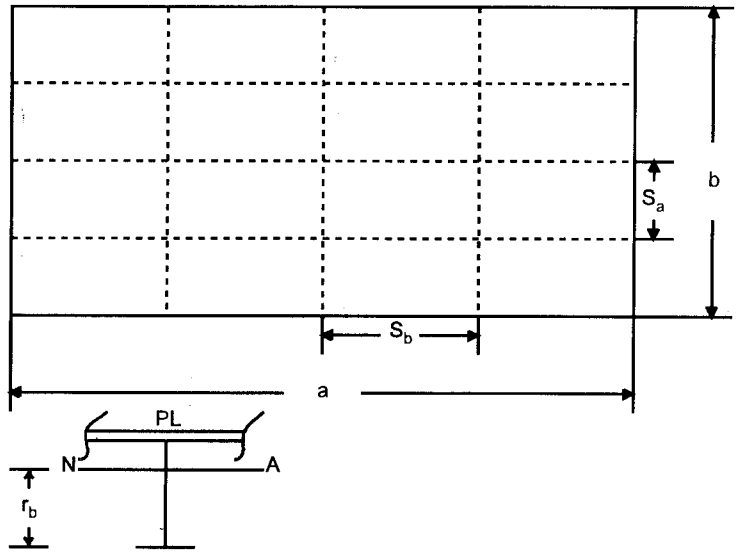
Dalam menggunakan diagram perancangan Schade, empat parameter khusus perlu diketahui yang didefinisikan sebagai berikut:

- *Kekakuan satuan*

$$i_a = \frac{I_{na}}{S_a} + 2\frac{(I_a - I_{na})}{b} \tag{6}$$

$$i_b = \frac{I_{nb}}{S_b} + 2\frac{(I_b - I_{nb})}{a} \tag{7}$$

di mana I_{na} (I_{nb}) adalah momen inersia, termasuk lebar efektif pelat, dari penegar memanjang (melintang); I_a (I_b) adalah momen inersi penegar tengah, termasuk lebar efektif pelat; S_a (S_b) adalah jarak antar penegar memanjang (melintang); a (b) adalah panjang (lebar) panel pelat. (lihat Gambar 5.6)



Gambar 5.6 Notasi Sistem Penegaran Panel

- *Koefisien torsional*

$$\eta \sqrt{\frac{I_{pa} I_{pb}}{I_{na} I_{nb}}} \tag{8}$$

dimana I_{pa} (I_{pb}) adalah momen inersia lebar efektif pelat yang bekerja dengan penegar-penegar memanjang (melintang);

- *Aspect ratio virtual*

$$\rho = \frac{a}{b}\sqrt{\frac{I_b}{I_a}} \tag{9}$$

Selanjutnya, lendutan di tengah-tengah panel pelat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$W = K\frac{p b^4}{E i_b} \tag{10}$$

dimana p adalah beban tekanan satuan merata. Harga K dapat diperoleh melalui Diagram K-ρ Lendutan Tengah Panel dari Schade untuk berbagai jenis tumpuan dan harga koefisien torsional η. Tegangan lengkung sepanjang tumpuan panel pelat σ dihitung dengan Diagram K-ρ Tegangan Lengkung Tepi Panel dari Schade untuk berbagai jenis tumpuan dan harga koefisien torsional η. Misalnya untuk kasus panel dengan keempat sisinya dijepit dan koefisien torsional $\eta = 1$ dan aspect ratio virtual $\rho > 1{,}60$, diperoleh harga $K = 0{,}0627$, dan tegangan lengkung tepi pelat sebagai berikut :

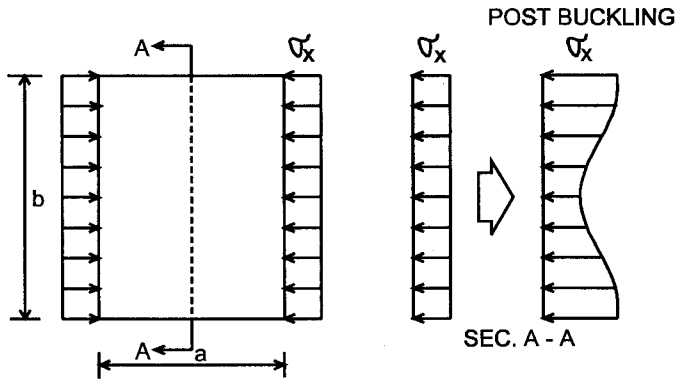
$$\sigma = K\frac{p b^4 r_a}{i_a i_b} \tag{11}$$

5.7 RESPON-RESPON STRUKTUR TERTIER

Yang dimaksud dengan respon-respon tertier adalah tegangan lengkung dan lendutan pada panel-panel pelat individual yang dibatasi oleh penegar-penegar dari suatu panel sekunder. Dalam banyak kasus, beban yang menyebabkan respon ini adalah tekanan fluida dari air di luar kapal atau cairan dalam tangki-tangki, atau muatan curah dalam ruang-ruang muat. Beban-beban ini tegak lurus panel pelat dan tersebar pada permukaan pelat. Dalam banyak kasus, tekanan yang bekerja dapat dianggap konstan pada seluruh bidang pelat. Pada dasarnya, respon ini dapat diperkirakan dengan merujuk pada kasus panel pelat tanpa penegar (jenis D) pada bagian sebelumnya.

Panel pelat jenis D memiliki perilaku tekuk elastis yang penting. Seperti pada kasus kolom yang mengalami tekuk, kekuatan pelat yang mengalami tekan pada bidang pelat dapat dikaji dengan mempertimbangkan sebuah te-

gangan kritis, yaitu tegangan tekan tertinggi pada bidang pelat yang semula rata yang dapat menimbulkan lendutan di luar bidang bukan nol di tengah pelat. Pada tegangan di bawah tegangan kritis, pelat tersebut dapat dibebani dalam arah panjang pelat, namun tidak terjadi lendutan di luar bidang bukan nol.



Gambar 5.7 Pelat yang Mengalami Tekuk Elastis

Penyelesaian teoretis untuk tegangan tekuk kritis elastis telah ditemukan untuk beberapa kasus penting, dan telah dinyatakan dalam Formula Bryan sebagai berikut:

$$\sigma_c = k_c \frac{\pi^2 E}{12(1-\upsilon^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{12}$$

Di sini k_c merupakan fungsi dari *aspect ratio* α, kondisi batas tepi pelat, dan jenis pembebanan. Harga-harga k_c telah dihitung untuk beberapa kasus praktis yang penting.

Untuk pelat dengan lebar ($\alpha < 1$), maka $n = 1$, sehingga tegangan kritis pelat σ_c dapat ditulis dengan lebih sederhana sebagai berikut :

$$\sigma_c = (1+\alpha^2)^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\upsilon^2)}\left(\frac{t}{a}\right)^2 \tag{13}$$

di mana t adalah tebal pelat.

Untuk pelat yang amat lebar ($\alpha << 1$), tegangan kritis pelat σ_c mencapai nilai batasnya pada persamaan 17.

$$\sigma_c \quad \frac{\pi^2 E}{12(1-\upsilon^2)}\left(\frac{t}{a}\right)^2 \tag{14}$$

Untuk pelat sempit ($\alpha > 1$) dan ditumpu sederhana, maka $k_c = 4$, sedangkan tegangan kritisnya menjadi:

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{3(1-\upsilon^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{15}$$

Harus dicatat disini bahwa rumus-rumus di atas tidak menunjukkan kekuatan pelat yang ditinjau, karena pada saat beban yang bekerja dilepas, maka pelat akan kembali pada kondisi semula.

Dalam menaksir kekuatan sebuah elemen pelat, tujuannya adalah untuk menentukan tegangan rata-rata maksimum yang dapat diterima pelat sebelum tegangan yang bekerja pada titik-titik tertentu pada pelat mencapai titik luluh sehingga terjadi deformasi plastis yang permanen.

Penyelesaian menyeluruh teoretis atas masalah ini belum ada, dan dalam banyak kasus perancang harus puas dengan rumus-rumus empirik dan data yang ada. Data kekuatan pelat yang banyak dipakai berpijak pada konsep lebar efektif b_e yaitu lebar tereduksi pelat yang mampu menerima beban total yang sama yang dapat diterima oleh pelat tertekuk, namun pada suatu tegangan merata yang sama dengan tegangan maksimum *se* pada tepi pelat:

$$b_e = (\frac{1}{\sigma_e})\int_0^b \sigma_x(y)dy \tag{16}$$

dimana $\sigma_x(y)$ adalah tegangan dalam arah-x; b adalah lebar pelat. Sebuah telaah komprehensif untuk menaksir lebar efektif b_e untuk pelat-pelat sempit tak berpenegar telah dilakukan oleh Faulkner (1975). Dalam telaah ini, diperkenalkan konsep *plate slenderness ratio* atau rasio kerampingan pelat β:

$$\beta = (\frac{b}{t})\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \tag{17}$$

yang diturunkan sebagai berikut. Jika $\alpha > 1$, maka $k_c = 4$, sehingga tegangan kritis elastis dapat dihitung dengan Persamaan (18). Untuk baja, dengan Angka Poisson ν konstan, maka tegangan kritis elastis ini merupakan fungsi dari Modulus Elastis E, t, dan b sebagai berikut:

$$\sigma_c \alpha E\left(\frac{t}{b}\right)^2$$

Apabila lebar pelat b_0 dipilih dalam hubungannya dengan t sedemikian sehingga tegangan kritis elastis σ_c sama dengan tegangan luluh bahan σ_y, kita peroleh hubungan sebagai berikut :

$$b_0 = \pi t\sqrt{\frac{E}{3(1-\upsilon^2)\sigma_y}}\alpha t\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \tag{18}$$

Faktor β adalah proporsional dengan perbandingan lebar pelat yang sebenarnya dengan lebar nominal ini, mengikuti sebagaimana dalam Persamaan 20, yang kemudian disebut rasio kerampingan pelat. Untuk baja, dengan ν = 0,3, harga b_0 yang sesungguhnya dalam Persamaan 21 menjadi:

$$b_0 = 1{,}9t\sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \tag{19}$$

Untuk baja lunak, σ_y=241 MPa, maka b_0, dari Persamaan 20 kurang lebih sama dengan 55t. Berpijak pada data-data eksperimen, untuk keperluan perancangan, harga yang lebih kecil sebesar 50t sering dipakai dengan lebar pelat efektif yang cocok dipakai dalam perancangan.

Keefektifan pelat dalam kondisi tekan juga akan dipengaruhi tiga faktor lain, yaitu 1) deformasi awal, terutama akibat proses pengelasan, 2) tegangan sisa, juga akibat pengelasan, dan 3) tekanan tegak lurus bidang pelat.

5.8 BUCKLING ELASTIS PELAT BERPENEGAR

Topik bahasan sebelumnya adalah moda pertama pelat berpenegar yang mengalami tekuk (*buckling*) dengan tekuk terjadi hanya pada pelat. Moda kedua disebut moda tekuk fleksural pada penegar bersama-sama dengan lebar efektif pelat yang melekat pada penegar tersebut, serupa dengan buckling pada kolom. Untuk panel pelat yang ditumpu sederhana, Mansour telah mengajukan rumus berikut untuk menentukan tegangan kritisnya:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{Al^2}\left[\frac{1}{\left(1+\frac{\pi^2 E I}{l^2 G A_s}\right)}\right] \tag{20}$$

di mana I adalah momen inersia efektif dari penegar dan lebar pelat efektif; A adalah luas penampang total; A_s adalah luas bidang geser; l adalah panjang penegar; dan G adalah modulus geser.

Moda ketiga adalah moda lateral-torsional yang biasa disebut *tripping*. Moda ini terjadi bila penegar relatif lemah terhadap puntir, sehingga kegagalan dipicu oleh terjadinya puntiran pada penegar sedemikian rupa sehingga sambungan antara penegar dan pelat tidak bergerak secara lateral. Sebagian pelat disebelah penegar boleh jadi berpartisipasi dalam puntiran tersebut, dan pelat hadap (*flange*) penegar juga terpuntir bersama-sama dengan webnya, atau keduanya terpuntir secara berbeda. Tegangan kritis yang menyebabkan tripping ini diberikan oleh Bleich (1952) sebagai berikut:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(l/r_e)} \tag{21}$$

dimana l adalah panjang penegar; r_e adalah jari-jari girasi efektif penampang. Secara umum, tripping ini dapat dihindari dengan pemasangan tripping bracket, sehingga pada umumnya tidak banyak berpengaruh pada kekuatan ultimat lambung. Moda keempat, yaitu buckling panel menyeluruh, telah diselesaikan oleh Mansour dengan menggunakan teori pelat ortotropik.

Sampai di sini perlu dicatat bahwa pembahasan sebelumnya terbatas untuk panel pelat yang perilakunya masih dalam batas-batas elastis bahan, sementara kekuatan ultimat panel pelat kapal mencakup deformasi plastis. Untuk memahami dan memperoleh informasi yang penting bagi perancangan, telah dipakai kombinasi metode-metode analitik, numerik, dan eksperimental. Dari hasil pengamatan diketahui bahwa kegagalan biasanya terjadi melalui mekanisme ke empat moda tekuk yang baru saja dibahas. Lebih jauh lagi, karena struktur kapal tersusun dari berbagai panel pelat berpenegar, kekuatan ultimat kapal merupakan suatu gabungan kekuatan ultimat panel-panel ini.

5.9 RESPON GETARAN AKIBAT BEBAN-BEBAN DINAMIS

Dua jenis beban dinamis pada kapal adalah, pertama, beban tumbuk slamming pada alas atau flare haluan kapal, diikuti oleh respon *transient whipping*. Yang kedua adalah *springing* getaran acak yang sedikit banyak *steady-state* yang ditimbulkan oleh komponen-komponen frekwensi gelombang tertentu. Taksiran atas respon struktural lokal terhadap *slamming* mempertimbangkan perilaku tak elastis struktur, sementara perhitungan untuk respon terhadap whipping dapat menggunakan model elastis linier.

Satu kesulitan dalam menaksir respon terhadap *slamming* disebabkan kecepatan vertikal relatif pada saat terjadi *slamming* bergantung pada kecepatan kapal, arah, dan kondisi laut. Oleh karena itu slamming sedikit banyak dapat dikendalikan oleh kapten kapal.

Untuk kapal perang, *slamming* pada tonjolan-tonjolan struktur diatas permukaan air masih merupakan masalah. Sampai saat ini masih belum diperoleh metode analitik untuk menaksir beban hidrodinamis pada kasus ini. Sementara ini springing ternyata menimbulkan pertambahan pada momen lengkung akibat gelombang dan tegangan hanya pada kapal-kapal yang lentur dan panjang dengan bentuk penuh. Penyelesaian untuk masalah ini bertumpu pada konsep balok Euler atau balok Timoshenko di atas tumpuan elastis.

5.10 KERUSAKAN KELELAHAN KUMULATIF

Kelelahan merupakan sumber kerusakan lokal yang banyak terjadi pada kapal, karena beban terpenting pada struktur kapal, yaitu beban akibat gelombang, terdiri dari sejumlah beban dengan siklus besar dengan arah berlawanan. Pengaruh kelelahan khususnya serius pada tempat-tempat dengan konsentrasi tegangan yang tinggi, dan retak lelah telah terbukti sebagai pemicu mekanisme kepecahan getas. Pencegahan terhadap kegagalan akibat kelelahan bahan dalam struktur kapal sangat bergantung pada perhatian mendalam atas perancangan dan fabrikasi rincian struktur untuk memperkecil konsentrasi tegangan.

Sebuah sumber kesulitan dalam menaksir kerusakan akibat kelelahan pada kapal bahwa beban siklis yang dihadapi adalah beban siklis yang acak, bukan beban periodik sederhana sebagaimana diperoleh dalam pembuatan kurva S-N. Namun demikian, taksiran atas kerusakan akibat kelelahan ini dapat didekati dengan menggunakan prosedur yang telah diajukan oleh Miner (1945). Dengan hipotesa Miner, dianggap bahwa satu siklus tegangan yang berubah secara acak, yang memiliki amplitudo sebesar s_i menyebabkan suatu kerusakan kelelahan yang mengikuti proporsi berikut:

$$\delta D_i = \frac{1}{N_i} \tag{22}$$

dimana N_i adalah jumlah siklus tegangan sinusoidal dengan amplitudo s_i yang dibutuhkan untuk menyebabkan terjadinya kerusakan kelelahan. Kerusakan kumulatif akibat kelelahan selama berada dalam lingkungan tegangan yang acak dengan demikian dapat dihitung dengan:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \tag{23}$$

dimana n_i adalah jumlah siklus tegangan s_i selama periode i, dan pejumlahan dilakukan atas semua s_i untuk semua i, sementara umur struktur adalah $1/D$.

Dalam kriteria perancangan yang berpijak pada hipotesa Miner, lazim dipakai pendekatan untuk mengakomodasi ketidakpastian dengan mensyaratkan bahwa struktur harus memiliki umur kelelahan yang diperpanjang, atau, harga D harus lebih kecil dari 1. Det Norske Veritas mensyaratkan harga $D = 0{,}1$ untuk komponen-komponen struktur utama yang sulit untuk diperiksa/diinspeksi atau dipelihara.

Pencegahan kegagalan kelelahan merupakan hal yang amat penting dalam perancangan kapal selam, perancang harus menghadapi rincian struktur yang menderita tegangan tinggi dengan siklus sebesar 20000 kali.

5.11 SUPERPOSISI TEGANGAN-TEGANGAN

Karena perhitungan tegangan-tegangan primer, sekunder, dan tertier dilakukan di atas anggapan perilaku elastik linier material struktur, intensitas tegangan yang dihitung untuk komponen struktur yang sama dapat dijumlahkan secara aljabar langsung untuk memperoleh harga maksimum dari tegangan gabungan tersebut.

Namun harus diingat, pertama bahwa prosedur yang dipakai dalam perhitungan tegangan-tegangan tersebut mengandung keakuratan dan keandalan yang berbeda. Kedua, komponen-komponen tegangan tersebut boleh jadi tidak terjadi pada saat atau fase yang sama. Ketiga, arah komponen-komponen tegangan maksimum primer, sekunder, atau bahkan tertier tersebut juga belum tentu sama, atau bahkan tidak terjadi pada bagian struktur yang sama.

5.12 KEKUATAN MELINTANG STRUKTUR KAPAL

Yang dimaksud dengan kekuatan melintang kapal adalah kemampuannya untuk menyangga beban-beban yang cenderung menyebabkan distorsi pada bentuk penampang melintang kapal. Apabila penampang kapal terdistorsi sebagai sebuah jajaran genjang, pengaruh ini disebut racking. Sampai disini harus dicatat, bahwa perhitungan-perhitungan kekuatan primer terhadap lengkung ataupun puntir di dasarkan pada anggapan bahwa tidak terjadi distorsi pada pada bentuk melintang kapal.

Taksiran atas respon kekuatan melintang kapal mencakup elemen kekuatan primer dan sekunder. Beban-beban yang menyebabkan pengaruh yang memerlukan analisa kekuatan melintang kapal sangat beragam bergantung pada jenis kapal, tataletak struktural, cara operasi, dan pengaruh lingkungan, sebagai berikut :

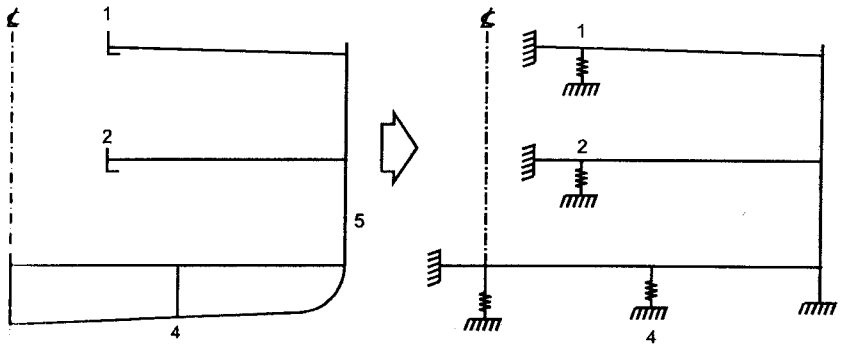
1. di atas dock;
2. tanker dengan tangki sayap kosong sementara tangki tengah penuh atau sebaliknya.

3. semua jenis kapal : pengaruh torsional dan racking akibat gerakan taksimetris saat rolling, swaying, ataupun yawing;
4. kapal-kapal dengan struktur interior yang sebagian besar terbuka seperti kapal pengangkut mobil atau ro-ro.

Seperti telah disinggung sebelumnya, respon struktur melintang mencakup interaksi erat antara komponen-komponen struktur memanjang dan melintang.

Sebagai contoh adalah sebuah gading melintang pada tengah ruang muat kapal yang menggunakan sistem konstruksi melintang. Lihat Gambar 4 beban-beban utama berasal dari tekanan air laut di sekeliling kapal, berat dan kelembaban struktur dan muatan kapal sendiri. Sebagai pendekatan awal, respon melintang gading seperti ini dapat dianalisa dengan memakai analisa prosedur dua dimensi dengan atau tanpa memperhitungkan sumbangan struktur memanjang. Hal ini telah dilakukan dengan metode distribusi momen Hardy-Cross, atau dengan analisa elemen hingga plane frame.

Dalam sebuah kapal konvensional yang memiliki sekat-sekat melintang dalam jarak kurang lebih selebar kapal, respon melintang gading dan pelat (efektifnya) sangat dipengaruhi oleh komponen-komponen struktur memanjang yang terhubung ke gading tersebut. Dalam perhitungan dua dimensi, hal ini dapat diperhitungkan dengan menempatkan kondisi-kondisi batas tertentu pada perpotongan kedua komponen tersebut. Model yang dapat mencakup fenomena ini terlihat juga dalam Gambar 5.7



Gambar 5.8 Analisa Kekuatan Melintang pada Kapal Barang

5.13 BANGUNAN ATAS

Pada saat lambung kapal melengkung sebagai respon terhadap beban saat berlayar, bangunan atas juga akan ikut melengkung sebagai respon pada beban yang diteruskan oleh sambungannya ke lambung utama kapal. Beban tersebut terdiri dari beban geser memanjang tersebar dan beban vertikal yang bekerja pada tepi-tepi bawah dari sisi-sisi bangunan atas tersebut. Dengan demikian, keberadaan dari bangunan atas dapat mempengaruhi perilaku struktur lambung kapal. Kekakuan gabungan yang ada boleh jadi jauh lebih besar daripada kekakuan lambung kapal saja jika bangunan atas cukup panjang, terbuat dari bahan yang sama, dan dihubungkan secara efektif.

Disamping efek-efek pada kekakuan lengkung menyeluruh dan pola tegangan yang terjadi, konsentrasi tegangan-tegangan lokal terjadi juga pada ujung-ujung bangunan atas karena adanya perubahan bentuk yang mendadak. Pada daerah ini diperlukan perhatian yang lebih mendalam atas rincian rancangan untuk menghindari masalah-masalah struktur yang terlokalisir.

Gaya-gaya geser horisontal dan beban-beban vertikal antara lambung dan bangunan atas akan cenderung menimbulkan efek-efek struktural yang berlawanan. Pada saat kondisi hogging, geladak kapal akan dalam kondisi teregang positif (tension) dan melengkung ke bawah. Apabila terjadi kompabilitas regangan (anggapan ini sahih dalam banyak kasus kapal) antara geladak dan sisi bawah bangunan atas, maka bangunan atas justru melengkung ke atas. Dengan demikan, lendutan kapal akan berlawanan arah dengan lendutan bangunan atas.

5.14 KONSENTRASI TEGANGAN

Tegangan-tegangan yang sejauh ini dibahas adalah tegangan rata-rata. Secara umum, setiap diskontinuitas pada struktur-struktur yang menerima tegangan akan megakibatkan pertambahan tegangan lokal di tempat diskontinuitas tersebut. Perbandingan antara tegangan maksimum dengan tegangan rata-rata apabila diskontinuitas tersebut tidak ada disebut faktor konsentrasi tegangan.

Tegangan seungguhnya terjadi di sekitar bukaan telah dihitung dengan berbagai cara, seperti 1) pengukuran langsung di laboratorium dengan menggunakan strain gauge atau secara foto elastis, dan 2) dengan metode elemen hingga dua dimensi (*plane stress*). Pada umumnya dapat disimpulkan bahwa bentuk-bentuk bukaan yang tidak mengandung sudut yang tajam (lingkaran atau ellips) memiliki sebaran tegangan yang lebih baik dari pada bukaan-bukaan yang menyudut (kotak, persegi banyak).

Diskontinuitas pada struktur kapal dapat berupa diskontinuitas akibat perubahan bentuk yang disebabkan oleh adanya bangunan atas, lubang palkah yang lebar, sudut-sudut atau cacat pada komponen yang tertegang, bukaan-bukaan untuk cargo handling, ataupun untuk keperluan-keperluan layanan teknik seperti pipa, kabel listrik, dsb.

Setiap bukaan tersebut menimbulkan masalah konsentrasi tegangan. Hal ini merupakan sebuah fenomena terjadinya lokalisasi tegangan akibat perubahan bentuk komponen struktur yang dibebani. Peran penting konsentrasi tegangan ditunjukkan oleh fakta bahwa kebanyakan kasus kepecahan pada struktur kapal berasal dari sudut-sudut bukaan tersebut. Akibatnya, tegangan yang terjadi menjadi berkali-kali lebih besar daripada tegangan nominal yang terhitung apabila tidak terdapat bukaan.

Bukaan-bukaan ataupun potongan-potongan pada struktur menimbulkan dua masalah : 1) pengurangan kekuatan pada bukaan/potongan tersebut, 2) konsentrasi tegangan pada daerah di sekitar bukaan. Faktor konsentrasi tegangan bertambah seiring dengan pertambahan lebar bukaan, dan ketajaman sudut-sudut potongan. Bukaan-bukaan tersebut kadang-kadang semula dimaksudkan untuk mengurangi berat struktur. Namun apabila pelubangan tidak dikompensasi atau tidak dilakukan secara benar, akan menimbulkan masalah.

Untuk mengatasi kedua masalah tersebut dapat dilakukan dengan 1) memindahkan lokasi bukaan ke daerah-daerah dengan tegangan yang lebih kecil, 2) mengubah bentuk lubang, dan 3) memberi penguatan lokal untuk mengkompensasi kehilangan kekuatan akibat bukaan.

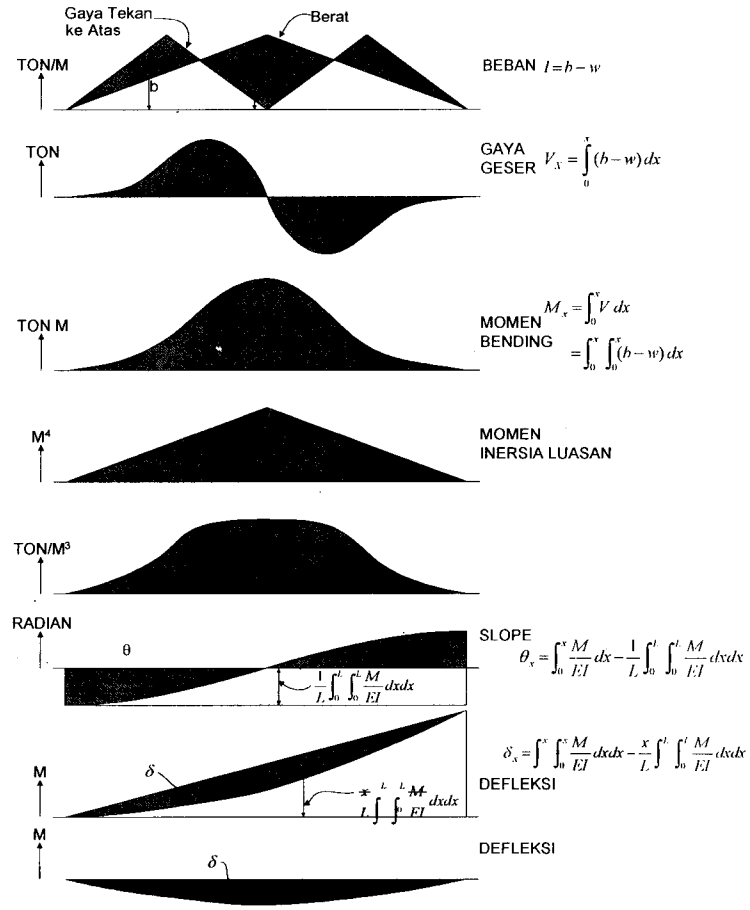
Pada umumnya, lubang dengan sudut-sudut tajam kurang baik dari segi konsentrasi tegangan. Sekalipun masih bergantung pada arah tegangan yang bekerja, lubang berbentuk ellips atau lingkaran memberi penyebaran tegangan yang lebih baik daripada bentuk-bentuk persegi. Untuk itu, setiap bukaan, apabila terpaksa berbentuk persegi, sudut-sudutnya perlu di *rounded* dengan jari-jari yang cukup.

Cara kedua dilakukan dengan memberikan cincin penguat di sekitar bukaan, atau menggunakan pelat ganda. Apabila digunakan pelat ganda, tepi-tepi pelat harus ditirus pada arah tegangan yang bekerja untuk mengurangi konsentrasi tegangan akibat perubahan tebal yang mendadak.

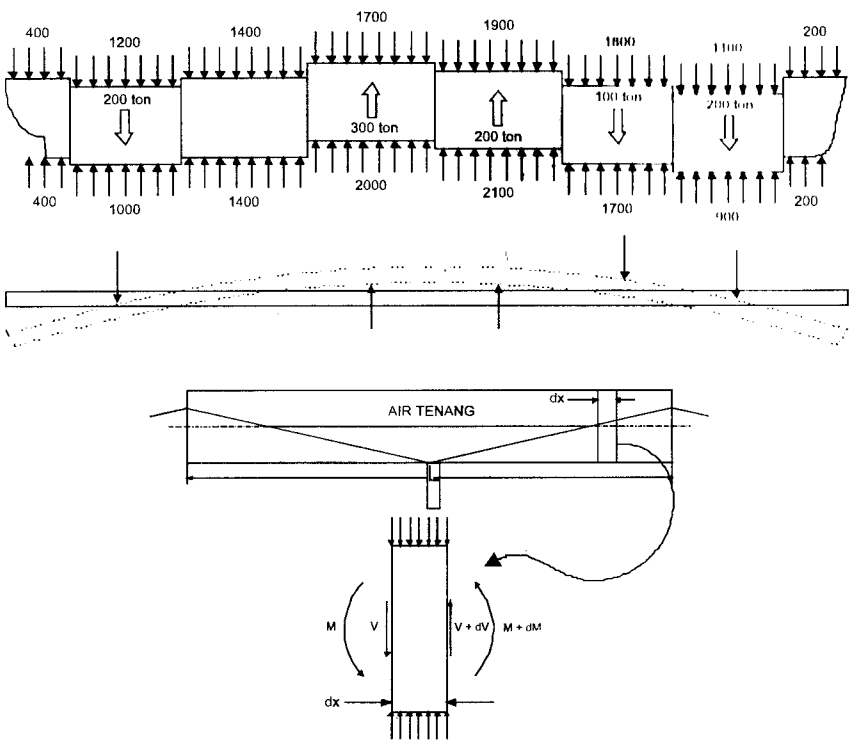
BAB 6
PERHITUNGAN KEKUATAN MEMANJANG KAPAL

6.1 PENDAHULUAN

Perhitungan kekuatan kapal dilakukan dengan model analisis balok prismatik eulerian. Dengan demikian, diperoleh hubungan antara beban, gaya lintang (*shear*), dan momen vertikal memanjang kapal, sebagai berikut:



Gambar 6.1 Grafik - Grafik Perhitungan Kekuatan Memanjang



Gambar 6.2 Pemodelan Kapal Akibat Momen Bending Memanjang

Beban q yang bekerja diperoleh dari selisih antara beban tersebar berat kapal dan muatannya dengan beban tersebar gaya tekan ke atas (*buoyancy*). Dengan membagi sebaran beban masing-masing dalam blok-blok beban diskrit, maka dapat dilakukan tabulasi sederhana untuk memperoleh besar beban q yang bekerja. Karena sebaran berat kapal dan gaya tekan ke atas umumnya tidak sama sepanjang kapal, maka distribusi beban tersebut bervariasi dan berubah arah pada sepanjang kapal. Selanjutnya dengan cara Simpson, dapat dilakukan integrasi numerik untuk menghitung gaya lintang dan momen vertikal memanjang kapal.

6.2 MENGHITUNG KEKUATAN MEMANJANG DENGAN MENGGUNAKAN BKI VOLUME II TAHUN 1996

Koefisien-koefisien yang dipakai adalah sebagai berikut:

k = faktor bahan
C_B = koefisien blok
x = jarak dalam [m] dari AP sampai posisi yang diinginkan
v_o = kecepatan kapal dalam [knot]
Iy = momen inersia dari midship kapal dalam [m^4] dengan sumbu netral horisontal
e_B = jarak sumbu netral ke dasar kapal
e_D = jarak netral aksis ke geladak kapal
W_B = modulus penampang dalam [m^3] terhadap dasar kapal
W_D = modulus penampang dalam [m^3] terhadap geladak kapal
M_T = bending momen total dalam [kNm]
M_{SW} = bending momen air tenang
M_{WV} = bending momen gelombang
M_{BF} = bending momen tambahan

Total bending momen memanjang kapal untuk klasifikasi *Bki* dapat dihitung dengan mengggunakan formula sebagai berikut:

$$M_T = M_{SW} + M_{WV} + M_{BF} \text{ [kNm]} \quad (1)$$

6.2.1 Bending Momen Gelombang

$$M_{WV} = L^2 \cdot B \cdot c_0 \cdot c_1 \cdot c_L \cdot c_M \quad (2)$$

c_0 = koefisien gelombang
$c_0 = L/25 + 4{,}1$ untuk $L < 90$ m
$c_0 = 10{,}75 - \left[\frac{300-L}{100}\right]^{1.5}$ untuk $90 \le L \le 300$ m
$c_0 = 10{,}75$ untuk $300 \le L \le 350$ m

$c_0 = 10{,}75 - \left[\frac{L-350}{150}\right]^{1.5}$ untuk $L \geq 350$ m

c_1 = faktor untuk hogging/sagging

$c_{1H} = 0{,}19 \cdot CB$ kondisi hogging

$c_{1S} = -0{,}11\ (CB + 0{,}7)$ kondisi sagging

$c_L = \frac{1}{2 - L/90}$ untuk $L < 90$ m

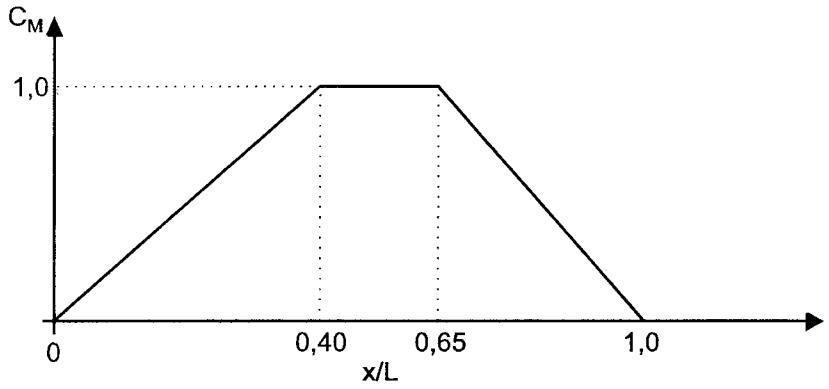
$c_L = 1{,}0$ untuk $L \geq 90$ m

c_M = faktor distribusi momen

$C_M = 2{,}5\ \frac{x}{L}$ untuk $\frac{x}{L} < 0{,}40$

$c_M = 1{,}0$ untuk $0{,}40 \leq \frac{x}{L} \leq 0{,}65$

$c_M = \frac{1 - \frac{x}{L}}{0{,}35}$ untuk $\frac{x}{L} > 0{,}65$



6.2.2 Bending Momen Tambahan Karena Beban Slamming pada Bagian Depan Kapal

Untuk kapal yang mempunyai panjang antara 110 m dan 180 m, dan mempunyai kelengkungan pada daerah *bow* (depan) dengan $\alpha > 30°$ untuk daerah x/L di atas 0,8 maka bending momen tambahan akibat beban slamming dihitung dan dimasukkan kedalam bending momen total. Dan perhitungan bending momen tambahan sebagai berikut:

$$M_{BF} = w \cdot L^4 \cdot B \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot c_{BF} \cdot 10^{-5} \qquad (3)$$

$w = 1{,}4$ untuk kondisi hogging

$w = -2{,}2$ untuk kondisi sagging

$n_1 = 1 - \frac{(145 - L)^2}{1225}$

$n_2 = \frac{b_1 - b_2}{1{,}2(H - T^*)} - 1$

b_1 = lebar dari geladak menerus tertinggi (*main deck*) [m] pada $x/L = 0{,}8$

b_2 = lebar dari garis air [m] pada $x/L = 0{,}8$

$n_3 = 0{,}33 + 0{,}67\ \frac{v_0}{1{,}6\sqrt{L}}$

$C_{BF} = 2{,}5\ \frac{x}{L}$ untuk $\frac{x}{L} < 0{,}4$

$C_{BF} = 1{,}0$ untuk $0{,}4 \leq \frac{x}{L} \leq 0{,}8$

$C_{BF} = 5\left[1 - \frac{x}{L}\right]$ untuk $\frac{x}{L} > 0{,}8$

T^* = sarat dari beban sesungguhnya atau kapal pada kondisi balas [m]

6.2.3 Bending Momen Air Tenang

Bending momen air tenang yang diizinkan dihitung dengan rumus:

M_{SW} M_I $(M_{WH}$ $M_{WH})$ [knm] (4)

$M_T = \sigma_p . W_{D(a)} . 10^3/f_R$ [knm] (5)

dan/atau

$M_T = \sigma_p . W_{B(a)} . 10^3/f_R$ [knm] (6)

dan harga terkecil yang diambil:

$\sigma_p = cs . \sigma_{p0}$

$\sigma_{p0} = 18{,}5\frac{\sqrt{L}}{k}$ untuk $L < 90$ m

$\sigma_{p0} = 175/k$ untuk $L \geq 90$ m

$c_S = 0{,}5 + \frac{5}{3}\frac{x}{L}$ untuk $\frac{x}{L} < 0{,}30$

$c_S = 1{,}0$ untuk $0{,}30 \leq \frac{x}{L} \leq 0{,}70$

$c_S = \frac{5}{3}\left[1{,}3 - \frac{x}{L}\right]$ untuk $\frac{x}{L} > 0{,}70$

$W_{D(a)}$ = modulus penampang geladak dalam [m³] yang sesungguhnya pada posisi x

$W_{B(a)}$ = modulus penampang dasar dalam [m³] yang sesungguhnya pada posisi x

f_R = 1,0 (umum)

6.2.4 Tegangan yang Diizinkan (σ_p)

Tegangan maksimum yang diizinkan oleh BKI akibat dari bending momen memanjang kapal baik untuk geladak ataupun untuk dasar kapal adalah :

$\sigma_p = cs . \sigma_{p0}$

$\sigma_{p0} = 18{,}5\frac{\sqrt{L}}{k}$ untuk $L < 90$ m

$\sigma_{p0} = 175/k$ untuk $L > 90$ m

$c_S = 0{,}5 + \frac{5}{3}\frac{x}{L}$ untuk $\frac{x}{L} < 0{,}30$

$c_S = 1{,}0$ untuk $0{,}30 \leq \frac{x}{L} \leq 0{,}70$

$c_S = \frac{5}{3}\left[1{,}3 - \frac{x}{L}\right]$ untuk $\frac{x}{L} > 0{,}70$

6.3 MENGHITUNG KEKUATAN MEMANJANG DENGAN METODE BERAT PER BAGIAN MENGGUNAKAN LR 64

Untuk menghitung kekuatan memanjang dengan metode ini maka tahap perhitungan sebagai berikut:

1. Perhitungan berat per section
   Berat dalam hal ini biasanya merupakan berat pada masing-masing bagian kapal baik DWT maupun LWT yang didistribusikan untuk masing-masing station. Station untuk perhitungan memanjang lazim menggunakan empat puluh station dimana jarak satu *station* adalah panjang kapal dibagi empat puluh. Dan cara perhitungan masing-masing bagian dengan menggunakan LR 64.
2. Perhitungan distribusi gaya tekan ke atas air tenang
   Gaya tekan ke atas atau displasment kapal merupakan distribusi gaya tekan ke atas yang diterima oleh kapal untuk masing-masing section tersebut. Untuk melihat berapa besar gaya tekan ke atasnya pada section tersebut kita menggunakan grafik bonjean dari kapal, biasanya pada saat kapal sarat penuh rata; sedemikian hingga gaya tekan ke atas dan titik beratnya masih memenuhi koreksi dengan penyebaran gaya beratnya.
3. Perhitungan gaya geser dan momen bending air tenang
4. Pembuatan gelombang sagging dan hogging
   Gelombang sagging dan hogging dibuat berdasarkan jenis gelombang yang kita pilih, sinusoidal atau trochoidal.
5. Perhitungan distribusi gaya tekan ke atas di gelombang
   Gaya tekan kondisi gelombang kita cari dengan menggunakan grafik gelombang dan bonjean. Gelombang kita plotkan sedemikian hingga gaya tekan ke atas dan titik beratnya masih memenuhi koreksi dengan penyebaran gaya beratnya.
6. Perhitungan momen inersia midship kapal
7. Perhitungan defleksi dan slope air tenang dan gelombang
8. Pengecekan dengan tzin yang diberikan oleh klas

Untuk memudahkan pengertian dari penjelasan di atas maka diberikan cara-cara perhitungan sebagai berikut:

6.4 LANGKAH 1 : PERHITUNGAN PENYEBARAN GAYA BERAT

Untuk penyebaran gaya berat umumnya diambil 85% dari perhitungan LR 64 untuk perhitungan berat dari masing-masing bagian. Secara umum berat itu terbagi atas:

A. Berat kapal kosong (LWT)
Berat kosong terdiri dari berat badan kapal sampai geladak teratas, berat bangunan atas (*forecastle, poop, navigation, boat, bridge* dan *wheel house*).

B. Dead Weight (DWT)
DWT meliputi berat provision, bahan bakar, minyak pelumas ,ABK, bagasi dan payload (muatan).

6.4.1 Perhitungan LWT

1. Berat kapal kosong sampai *upper deck* (perhitungan dengan LR tahun1964)

1.1 Antara AP dan FP

Beban merata :

$$q = a \times m \qquad \text{[ton/m]}$$

dimana :

a adalah harga yang merupakan fungsi dari Cb dan no. station kapal, dimana harga untuk *after body* berdasarkan grafik no 3 dan harga untuk *fore body* berdasarkan grafik 4.

$$m = 43{,}4 \times H \times L/10^4 \qquad (7)$$

$H = C_1 \times B + C_2 \times D + C_3 \times d + C_4 \times W_o \times N_t + C_5 + 2{,}5 \times h$

C_1, C_2, C_3, C_4 = konstanta yang merupakan fungsi dari jumlah geladak (Nd)

W_o = harga yang merupakan fungsi dari panjang kapal, berdasarkan dari grafik 1.a

Nt = jumlah sekat melintang

C_5 = harga yang merupakan fungsi dari panjang kapal, berdasarkan dari grafik 2

h = tinggi pelintang alas

1.2 Diluar AP dan FP

a. Diluar AP

Distribusi beban di luar AP berbentuk parabola dan titik berat beban terhadap AP 3,8 × L , dimana L panjang bangunan. Beban didistribusikan ke dalam station AP s/d 4

$$W = 0{,}01133 \times m \times L \qquad (8)$$

b. Diluar FP

Distribusi beban diluar FP berbentuk segitiga dan titik berat terhadap FP 1/3× L , dimana L panjang bangunan. Beban didistribusikan kedalam station 38 s/d FP

$$W = 0{,}00175 \times m \times L \qquad (9)$$

2. Berat ruangan-ruangan

2.1 Ruangan di bawah *poop deck*

Distribusi beban ruangan di bawah poop deck berbentuk trapesium dengan L panjang ruangan poop

$$W = 0{,}1292 \times V \qquad (10)$$

V = volume ruangan poop

$W = ½ \times L \times (q + 4q)$

2.2 Ruangan di bawah *boat deck*, *bridge deck* dan *navigation deck*

Distribusi beban ruangan di bawah boat deck, bridge deck dan navigation deck berbentuk segi empat dengan L panjang ruangan.

$$W = 0{,}1185 \times V \qquad (11)$$

V = volume ruangan

$W = ½ \times L \times (q + 4q)$

2.3 Ruangan di bawah *top deck*

Distribusi beban ruangan di bawah *top deck* berbentuk segi empat dengan L panjang ruangan.

$$W = 0{,}1185 \times V \qquad (12)$$

V = volume ruangan

$W = q \times L$

2.4 Ruangan di bawah *fore castle deck*

Distribusi beban ruangan di bawah fore castle deck berbentuk segi tiga dengan L panjang ruangan.

$$W = 0{,}1185 \times V \quad (13)$$

V = volume ruangan

$W = ½ \times q \times L$

2.5 Peralatan pada ujung kapal

Terdiri dari: jangkar, cable, hawser, windlass, capstan, bollard, steering gear. Distribusi beban peralatan di ujung kapal berbentuk segi empat.

a. ujung depan

Berat:

$$W = 43{,}75\ \text{Lpp}^2 / 10^4 \quad (14)$$

sedangkan L untuk panjang pembebanannya = 0,02 Lpp

$W = q \times L$

b. ujung belakang

Berat:

$$W = 10{,}94\ \text{Lpp}^2 / 10^4 \quad (15)$$

sedangkan L untuk panjang pembebanannya = 0,02 Lpp

$W = q \times L$

2.6 Peralatan bongkar muat

Terdiri dari: boom, winch, rope dan block, dll. Distribusi beban peralatan bongkar muat berbentuk segi empat.

Berat:

$$W = [0{,}008 \sum(S.W.L)^2 + 5\, n_b] + 10 \quad (16)$$

$\sum(S.W.L)$ = jumlah dari safe working load setiap boom pada tiap pos

n_b = jumlah boom

panjang pembebanan = 0,02 Lpp

$W = q \times L$

2.7 Kamar Mesin

Terdiri dari: berat permesinan termasuk konstruksi pendukungnya, funnel, dll. Distribusi beban kamar mesin berbentuk segi empat

Berat :

$$W = W_m + [0{,}044L - 1{,}17] \quad (17)$$

W_m = berat mesin induk dan mesin bantu berserta peralatan pendukungnya

λ_B = panjang kamar mesin sebagai panjang pembebanan

$W = q \times L$

2.8 Baling-baling dan Poros di luar ruang mesin

Distribusi beban baling-baling dan poros di luar kamar mesin berbentuk segi empat.

$$W = [0{,}0164L + S] \quad (18)$$

λ_S = panjang poros diluar kamar mesin dari sekat ceruk belakang sampai baling-baling

S = berdasarkan grafik 5a merupakan fungsi dari λ_S/L

$W = q \times L$

2.9 Tangki Ceruk Buritan dan Ceruk Haluan

Distribusi berat sepanjang ceruk buritan dan ceruk haluan berbentuk segitiga dengan L panjang ruangan

$$W = 0{,}0538 \times V \quad (19)$$

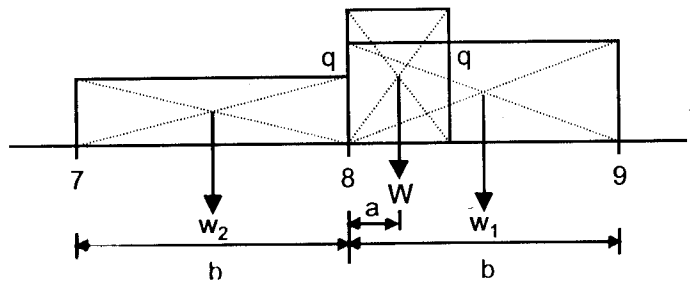
V = volume ruangan

$W = ½ \times q \times L$

6.4.2 Perhitungan DWT

Perhitungan penyebaran beban dari DWT sama dengan perhitungan penyebaran beban LWT, hanya saja berat dari masing-masing bagian sudah diketahui berdasarkan perhitungan pada saat perencanaan rencana umum (*General Arrangement*).

Untuk bentuk pembebanan, kita tidak memakai bentuk pendekatan segitiga, segi empat ataupun trapesium. Tetapi kita sebarkan beban-bebannya sesuai dengan lengkung bonjean (luas dari masing-masing station) yang ditinjau. Untuk lebih mempermudah pengertian maka diberikan sebuah contoh perhitungan penyebaran beban untuk tangki minyak pelumas.



h = jarak station

Titik berat terhadap station A :

$X = \Sigma 2 / \Sigma 1 \times h$ [m]

Titik berat terhadap station 8 :

Beban disitribusikan dalam station 3 - 5 dengan menggunakan formula seperti biasa

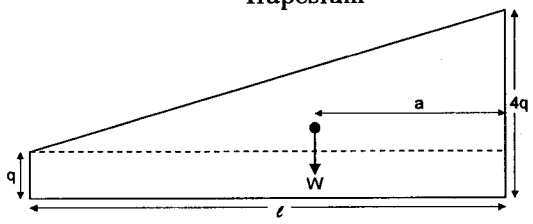
$W = w_1 + w_2$

$$W \,.\, a = w_1 \cdot \frac{b}{2} - w_2 \cdot \frac{b}{2}$$

$$\begin{array}{ll} W \,.\, b & = w_1 \,.b + w_2 \,.b \\ 2 \,.\, W \,.\, a & = w_1 \,.\, b - w_2 \,.b \\ \hline W \,.\, (b\text{-}2a) & = 2 \,.\, w_2 \,.\, b \\ w_2 & = W \,.\, (b\text{-}2a)/2b \\ w_1 & = W - w_2 \end{array}$$

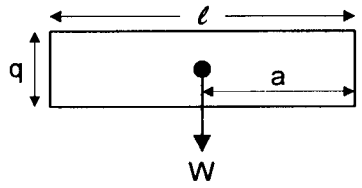
- *Macam-macam bentuk pembebanan*

Trapesium



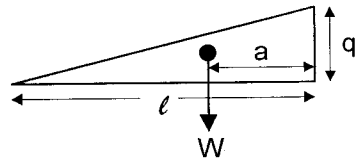
$$q = \frac{2W}{5l} \longrightarrow a = \frac{2l}{5}$$

Segiempat



$$q = \frac{W}{l} \longrightarrow a = \frac{l}{2}$$

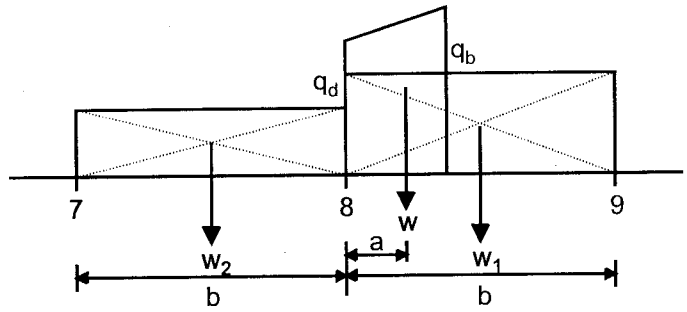
Segitiga



$$q = \frac{W}{2l} \longrightarrow a = \frac{l}{3}$$

- *Contoh-contoh penyebaran beban*

1. Bentuk Pembebanan Trapesium



Titik acuan station 8.

Pendistribusian berat tersebut ke station 7-8 dan 8-9 .

$$A_1 = q_d \times l \longrightarrow a_1 = \frac{1}{2} \times l$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \times l (q_b - q_d) \longrightarrow a_1 = \frac{2}{3} \times l$$

a = titik berat luasan terhadap station 8

$W = A_1 + A_2 \longrightarrow a = \dfrac{A_1 \times a_1 + A_2 \times a_2}{W}$

$W = w_1 + w_2$

MILIK

$$W \cdot a = w_1 \cdot \frac{b}{2} - w_2 \cdot \frac{b}{2}$$

$$W \cdot b = w_1 \cdot b + w_2 \cdot b$$

$$2 \cdot W \cdot a = w_1 \cdot b - w_2 \cdot b$$

$$W \cdot (b\text{-}2a) = 2 \cdot w_2 \cdot b \quad -$$

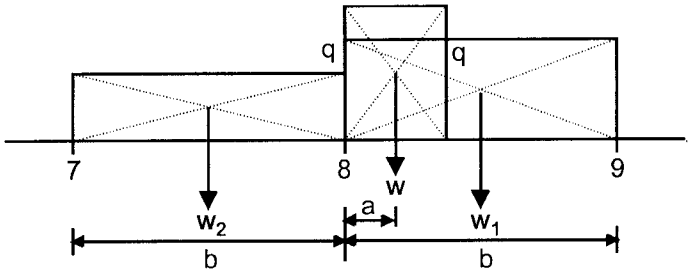
$$w_2 = W \cdot (b\text{-}2a)/2b$$

$$w_1 = W - w_2$$

Sehingga beban merata 7-8 $= w_2/b$ ton/m

dan beban merata 8-9 $= w_1/b$ ton/m

2. Bentuk Pembebanan Segiempat



Titik acuan station 8.

Pendistribusian berat tersebut ke station 7-8 dan 8-9 .

$$A_1 = q_d \times l \longrightarrow a_1 = \frac{1}{2} \times l$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \times l (q_b - q_d) \longrightarrow a_1 = \frac{2}{3} \times l$$

a = titik berat luasan terhadap station 8

$$W = A_1 + A_2 \longrightarrow a = \frac{A_1 \times a_1 + A_2 \times a_2}{W}$$

$$W = w_1 + w_2$$

$$W \cdot a = w_1 \cdot \frac{b}{2} - w_2 \cdot \frac{b}{2}$$

$$W \cdot b = w_1 \cdot b + w_2 \cdot b$$

$$2 \cdot W \cdot a = w_1 \cdot b - w_2 \cdot b$$

$$W \cdot (b\text{-}2a) = 2 \cdot w_2 \cdot b \quad -$$

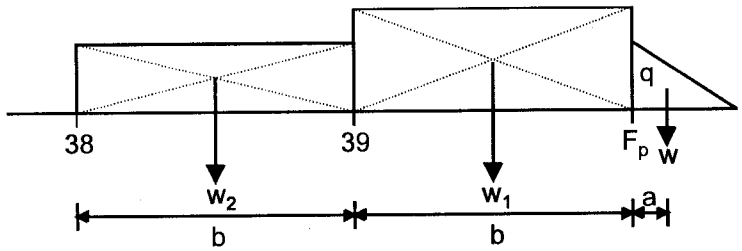
$$w_2 = W \cdot (b\text{-}2a)/2b$$

$$w_1 = W - w_2$$

Sehingga beban merata 7-8 $= w_2/b$ ton/m

dan beban merata 8-9 $= w_1/b$ ton/m

3. Bentuk Pembebanan Segitiga



Titik acuan station Fp

Pendistribusian berat tersebut ke station 38-39 dan 39-Fp .

$$W = w_1 + w_2$$

$$W \cdot a = - w_1 \cdot \frac{b}{2} - w_2 \cdot \frac{3b}{2}$$

$$W \cdot b = w_1 \cdot b + w_2 \cdot b$$

$$2 \cdot W \cdot a = - w_1 \cdot b - w_2 \cdot 3b$$

$$W \cdot (b\text{+}2a) = - 2 \cdot w_2 \cdot b \quad +$$

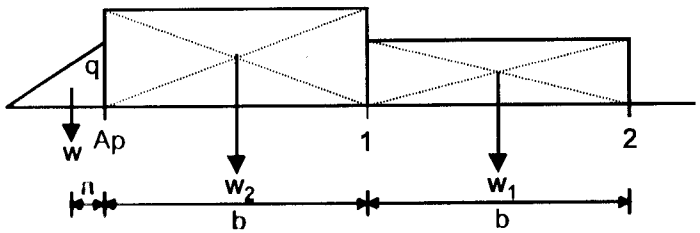
$$w_2 = -W \cdot (b\text{+}2a)/2b$$

$$w_1 = W - w_2$$

Sehingga beban merata 38-39 $= w_2/b$ ton/m

dan beban merata 39-Fp $= w_1/b$ ton/m

4. Bentuk Pembebanan Segitiga



Titik acuan station Ap

Pendistribusian berat tersebut ke station Ap-1 dan 1-2 .

$W = w_1 + w_2$

$$W \cdot a = - w_2 \cdot \frac{b}{2} - w_1 \cdot \frac{3b}{2}$$

$W \cdot b = w_1 \cdot b + w_2 \cdot b$

$2 \cdot W \cdot a = - w_2 \cdot b - w_1 \cdot 3b$

$W \cdot (b+2a) = - 2 \cdot w_1 \cdot b$ +

$w_1 = -W \cdot (b+2a)/2b$

$w_2 = W - w_1$

Sehingga beban merata Ap-1 $= w_2/b$ ton/m

dan beban merata 1-2 $= w_1/b$ ton/m

6.5 LANGKAH 2 : PERHITUNGAN GAYA TEKAN KE ATAS, GAYA GESER DAN MOMEN LENGKUNG MEMANJANG KONDISI AIR TENANG

6.5.1 Penyebaran Gaya Tekan ke Atas Kondisi Air Tenang

Penyebaran gaya tekan ke atas pada kapal sarat penuh

$$a(x) = 1{,}025 \times 1{,}004 \times A \qquad (20)$$

dimana A adalah area station yang ditinjau.

6.5.2 Koreksi Berat dan Titik Berat

Berdasarkan penyebaran gaya tekan ke atas kondisi air tenang

Berat = W

Titik Berat = X

Berdasarkan perhitungan berat kapal

Berat = W'

Titik Berat = X'

maka koreksi yang harus dipenuhi:

1. Koreksi Berat

$$\left|\frac{W - W'}{W}\right| \times 100\% \cdot 0{,}5\%$$

2. Koreksi Titik Berat

$$\left|\frac{X - X'}{X}\right| \times 100\% < 0{,}05\%$$ dan kedua-duanya harus dipenuhi.

6.6 LANGKAH 3: PERHITUNGAN GAYA TEKAN KE ATAS, GAYA GESER DAN MOMEN LENGKUNG MEMANJANG KONDISI GELOMBANG

6.6.1 Pembuatan Gelombang

Dalam perhitungan pada kondisi gelombang di laut bebas diperlukan asumsi sebagai berikut:

- Panjang gelombang (Lw) sama dengan panjang kapal Lpp
- Tinggi gelombang (Hw) sama dengan $Lw/20$ dianggap mewakili keadaan terburuk yang mungkin dialami
- Pada keadaan kapal di satu puncak gelombang, puncak gelombang dianggap di tengah kapal (Hogging)
- Pada keadaan kapal di dua puncak gelombang, puncak gelombang di anggap di AP dan FP (Sagging)
- Arah dan kecepatan gerakan gelombang sama dengan arah dan kecepatan kapal.

Bentuk gelombang yang dipakai dalam perhitungan ini yaitu Sinusoidal, dengan persamaan gelombang sebagai berikut:

$$y = \frac{Hw}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{Lw} - \frac{\pi}{2}\right) \qquad (21)$$

X [m]	Y [m]
AP	
L/20	
3*L*/20	
4*L*/20	
5*L*/20	$y = \frac{Hw}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{Lw} - \frac{\pi}{2}\right)$
6*L*/20	
7*L*/20	
8*L*/20	
9*L*/20	
Midship	

$$y = \frac{Hw}{2}\sin\left(\frac{2\pi x}{Lw} + \frac{\pi}{2}\right) \qquad (22)$$

X [m]	Y [m]
AP	
L/20	
3*L*/20	
4*L*/20	
5*L*/20	$y = \frac{Hw}{2}\sin\left(\frac{2\pi x}{Lw} + \frac{\pi}{2}\right)$
6*L*/20	
7*L*/20	
8*L*/20	
9*L*/20	
Midship	

Setelah gelombang selesai dan diplotkan pada bonjean kemudian dihitung gaya tekan ke atas dan titik berat gaya tekan ke atas pada kondisi gelombang.

6.6.2 Koreksi Kondisi Gelombang

1. Penyebaran gaya tekan ke atas kondisi gelombang

   Penyebaran gaya tekan ke atas pada kondisi gelombang

   $a(x) = 1{,}025 \times 1{,}004 \times A$

   dimana A adalah area station yang ditinjau
2. Koreksi berat dan titik berat kondisi gelombang

   Berdasarkan penyebaran gaya tekan ke atas kondisi gelombang

   Berat = W

   Titik Berat = X

   Berdasarkan perhitungan berat kapal

   Berat = W'

   Titik Berat = X'

   maka koreksi yang harus dipenuhi:

   1. Koreksi Berat

      $$\left|\frac{W - W'}{W}\right| \times 100\% \cdot 0{,}5\%$$

2. Koreksi Titik Berat

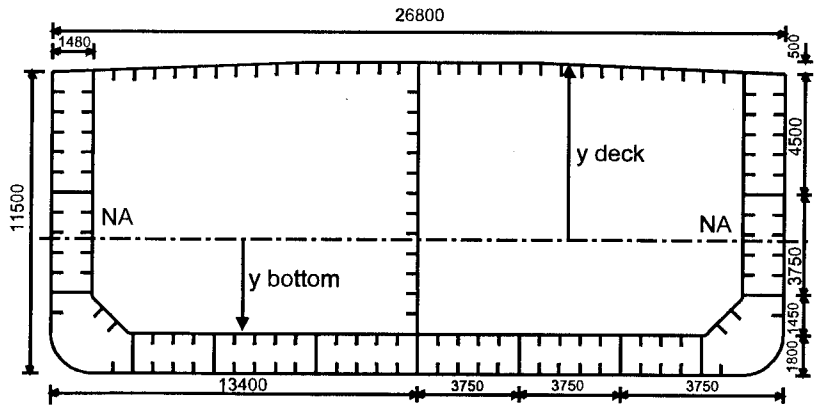
   $$\left|\frac{X - X'}{X}\right| \times 100\% < 0{,}05\%$$

   dan kedua-duanya harus dipenuhi, jika belum dipenuhi maka kita harus *trial and error* sehingga kedua-duanya terpenuhi.

6.7 LANGKAH 4: PERHITUNGAN MOMEN INERSIA MIDSHIP KAPAL, DEFLEKSI DAN SLOPE UNTUK KONDISI AIR TENANG DAN GELOMBANG

Momen Inersia Midship Kapal adalah momen inersia luasan potongan melintang badan kapal terhadap netral aksisnya. Untuk perhitungan momen inersia luasan tersebut maka diambil suatu gambar potongan melintang kapal yang dikenai momen yang paling besar, biasanya diwakili potongan melintang pada midship kapal. Karena di daerah tersebut umumnya momen lengkung terbesar dibandingkan dengan daerah lain sepanjang kapal.

Bagian yang dihitung adalah semua profil dan pelat yang mendukung kekuatan memanjang kapal. Dengan kata lain bahwa semua itu bergantung pada jenis sistem konstruksi yang digunakan. Untuk sistem konstruksi melintang maka pendukung kekuatan memanjangnya sedikit jika dibandingkan dengan sistem konstruksi memanjangnya.



Gambar 6.3 Penampang Midship Kapal

Untuk tabel perhitungannya, kami berikan contoh sebagai berikut:

Tabel 6.1 Resume Perhitungan Modulus Penampang

No	Nama Bagian	Jumlah	Luas	Total Luas (At)	Titik Berat Thp dasar (Z)	At x z	At x z^2	Momen Inersia Individu (I_0)
			[cm^4]	[cm^4]	[cm]	[cm^3]	[cm^4]	[cm^4]
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
				(1) x (2)		(3) x (4)	(3) x $(4)^2$	b x h^3 / 12
1	Pelat lunas							
2	Pelat Alas							
3	Pelat Alas Dalam							
4	Penumpu Tengah							
5	Penumpu Samping							
6	Pembujur Alas							
7	Pembujur Alas Dalam							
8	Pembujur Sisi							
9	Pembujur Sekat							
10	Pelat Bilga							
11	Pelat Sisi							
12	Pelat Lajur Atas							
13	Pelat Geladak							
14	Pembujur Geladak							
15	Penumpu Geladak							
16	Stringer (Senta)							
				Σ_1		Σ_2	Σ_3	Σ_4

Titik Berat $= z_1$ (terhadap dasar) $= \Sigma_2/\Sigma_1$

z_2 (terhadap geladak) $= H$ (tinggi kapal) $- z_1$

Momen Inersia total $= \Sigma_3 + \Sigma_4 = \Sigma_5$

Momen Inersia Total $= I_{NA} = \Sigma_5 - At\, z_1^2$

Modulus Penampang Terhadap Dasar $= W_1 = I_{NA}/z_1$

Modulus Penampang Terhadap Geladak $= W_2 = I_{NA}/z_2$

Contoh tabel untuk perhitungan momen bending dan gaya lintang

Tabel 6.2 Perhitungan Gaya Geser dan Momen Bending Memanjang

Station	q(x) [ton/m]	a(x) [ton/m]	p(x) [ton/m]	Q [ton]	Koreksi linier: Koreksi Q [ton]	Koreksi linier: Q koreksi [ton]	M [ton.m]	Koreksi Linier: Koreksi M [ton.m]	Koreksi Linier: Mkoreksi [ton.m]	Q(x) [ton]	M(x) [ton.m]
	[1]	[2]	[1]+[2]	[4]	[5]	[4]-[5]=[6]	[7]	[8]	[7]-[8]=[9]	[6]xb	[9]xb2/2
Ap - 1	-10	5	-5	-5							
1 - 2	-15	20	10	5							
2 - 3	-25	30	10	15							
3 - 4	-35	40	5	20							
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
39 - 40	-5										

Keterangan :
Data perhitungan

L = Lpp $\qquad Q_{maks} = b \times Q$

b = Lpp/40 $\qquad M_{maks} = (b^2/2) \times M$

$Q_R = b \times Q_{39\text{-FP}}$ $\qquad Q_R < 0{,}03\, Q_{maks} \rightarrow$ koreksi linier

$M_R = (b^2/2) \times M_{39\text{-FP}}$ $\qquad M_R < 0{,}06\, M_{maks} \rightarrow$ koreksi linier

↳ cara perhitungan Q

↳ cara perhitungan M

b : jarak station (kapal dibagi dalam 40 station)

$q(x)$ bertanda negatif karena berat arahnya ke bawah

$a(x)$ bertanda positif karena berat arahnya ke atas

6.8 LANGKAH 5 : PENGECEKAN PERHITUNGAN SESUAI DENGAN TEGANGAN YANG DIIZINKAN RULES BKI

Data yang diperlukan:

1. Modulus penampang dasar (W_1)
2. Modulus penampang geladak (W_2)

3. Momen maksimum di air tenang ($M_{maks}\,AT$)
4. Momen maksimum di gelombang sagging/hogging ($M_{maks}\,SG/M_{maks}\,HG$)

Pengecekan:

1. Tegangan di dasar kapal
   a. σ di air tenang $= M_{maks}\,AT\,/\,W_1$
   b. σ di gelombang $= M_{maks}\,SG\,/\,W_1$
   c. σ izin BKI =

      syarat memenuhi : (a) < (c) dan (b) < (c)

2. Tegangan di geladak kapal
   a. σ di air tenang $= M_{maks}\,AT\,/\,W_2$
   b. σ di gelombang $= M_{maks}\,SG\,/\,W_2$
   c. σ izin BKI =

      syarat memenuhi : (a) < (c) dan (b) < (c)

Kapal dikatakan memenuhi kekuatan memanjang apabila dasar kapal dan geladak kapal tegangannya memenuhi kedua syarat di atas.

BAB 7
ANALISA KEANDALAN DALAM REKAYASA SISTEM KONSTRUKSI

7.1 LATAR BELAKANG

Penerapan analisa keandalan (*Reliability Analysis*) dalam industri perkapalan atau Anjungan Lepas Pantai, khususnya di bidang struktur/konstruksi, secara progresif dikembangkan karena tuntutan permintaan untuk memberi pijakan rasional atas tingkat keselamatan/ risiko yang ada pada struktur/konstruksi tersebut. Tujuan dari semua keputusan pada tahap perancangan dan pemeliharaan adalah untuk memperoleh suatu struktur dengan nilai ekonomi dan tingkat keandalan yang cukup. Keandalan struktur secara umum dapat dihitung dengan metode keadaan batas (*Limit State methods*). Dalam metode ini ketahanan atau kekuatan dibagi oleh suatu faktor (*Resistance factor*) sedangkan beban dikalikan dengan suatu faktor (*Load factor*). Metode keadaan batas ini secara tidak langsung dapat dipakai untuk semua tahap perancangan dan pemeliharaan tersebut. Kemudian probabilitas kegagalan struktur dihitung. Probabilitas kegagalan ini dianggap sebagai ukuran yang rasional untuk keamanan struktur.

Metode probabilitas menawarkan suatu cara perbandingan yang lebih baik dengan memperhatikan semua mekanisme kegagalan seperti keruntuhan, kelelahan dan sebagainya. Metode Probabilitas dapat menjadikan tingkat keamanan menyeluruh yang lebih baik dan lebik cocok untuk perancangan.

Lebih daripada itu metode keandalan menawarkan kemampuan untuk pemahaman yang lebik baik dengan melibatkan bermacam-macam variabel ketidakpastian. Metode probabilitas dapat disetarakan dengan analisa kepekaan. Analisa keandalan merupakan langkah yang maju, yaitu suatu metode/ alat untuk mengetahui pengaruh variasi penting pada semua parameter yang saling berhubungan. Metode Probabilitas secara prinsip telah diterima sebagai alternatif lain dari metode deterministik yang lama.

Dalam suatu analisa keandalan yang terpenting adalah penentuan batas keselamatan, SM (*Safety Margin*) atau bisa juga dikatakan sebagai penetapan moda kegagalan (SM) sesuai dengan permasalahan yang akan ditinjau segi keandalan strukturnya.

Sedangkan metode analisa keandalan itu sendiri ada bermacam-macam yaitu metode MVFOSM level II, AFOSM level II dan level III ataupun dengan menggunakan Simulasi Montecarlo.

7.2 PENGERTIAN KETIDAKPASTIAN

Pada analisa teknik dan perancangan ketidakpastian dapat dilibatkan dengan memakai analisa probabilitas mengingat struktur menghadapi risiko kegagalan. Risiko ini yang diterima oleh suatu struktur akan mempengaruhi keselamatan struktur dan bentuk struktur tersebut. Analisa keandalan struktur menitikberatkan pada perlakuan dan pemilihan ketidakpastian secara rasional dan menyangkut masalah pengambilan keputusan yang rasional. Dalam hal ini semua besaran (kecuali konstanta fisik dan matematik) yang langsung dalan perhitungan teknik, dalam kenyataan sebenarnya tidak tentu, berbeda dengan konsep analisa deterministik yang hanya melakukan perhitungan dengan pendekatan faktor keamanan (S) yang merupakan rasio dari kemampuan (*Capability*=C) atau kekuatan dengan permintaan (*Demand*=D) atau beban terjelek (*Worst Load*) atau $S = \frac{C}{D}$. Pada analisa keandalan permasalahan dianalisa dengan tiga pertimbangan, yaitu: harga rata-rata, simpangan baku dan fungsi peluang dimana ketiga besaran tersebut menunjukkan adanya ketidakpastian.

Untuk menghitung ketidakpastian pada struktur dengan memakai metode analisa keandalan, perlu didefinisikan perubah dasar (*basic variabel*). Perubah dasar adalah sekumpulan besaran dasar yang menghasilkan tanggapan (*response*) statis maupun dinamis dari struktur. Semua ini dipakai secara fundamental oleh perencana dalam perhitungan struktur, selain itu pada analisa sistem struktur maka perlu untuk mendefinisikan ketidakpastian yang diterima oleh struktur tersebut. Ketidakpastian itu bisa dibagi 3 yaitu :

1. Ketidakpastian Fisik adalah ketidakpastian yang berhubungan dengan keragaman (*variability*) fisik seperti : beban, sifat material, ukuran material. Keragaman fisik ini hanya bisa dinyatakan dalam contoh data dengan pertimbangan praktis dan ekonomis.
2. Ketidakpastian Statistik, berhubungan dengan data-data yang dipakai untuk membuat model secara probabilistik dari berbagai macam keragaman fisik di atas. Data-data ini harus ditentukan jenis distribusi probabilitasnya serta harga parameter-parameternya. Parameter-parameter itu dengan sendirinya dianggap sebagai perubah acak, sedangkan ketidakpastian yang tergantung pada data itu disebut Ketidakpastian Statistik.

3. Ketidakpastian Model, adalah ketidakpastian yang berhubungan dengan anggapan dari jenis struktur yang dimodelkan secara matematis dalam bentuk deterministik atau probabilistik. Ketidakpastian yang terjadi disini hasil dari penyederhanaan dengan memakai bermacam-macam asumsi, kondisi batas yang tidak diketahui, dan diketahuinya pengaruh perubah yang lain serta hubungan perubah-perubah yang tidak tercakup dalam model.

Adanya ketidakpastian dalam persoalan rekayasa selama ini secara tradisional telah diakomodasikan melalui konsep angka keamanan (*Safety Factor*) yang secara prinsip hanya memperhatikan harga rata-rata besaran-besaran desain. Jelas sekali, bahwa pendekatan angka keamanan, walaupun cukup memadai, tidak memperhitungkan adanya sebaran atau variabilitas pada besaran-besaran desain, sehingga persoalan di atas semakin jelas bahwa pertimbangan peluang (probabilitas) dalam kerangka rekayasa keandalan memberikan basis yang lebih rasional untuk mengakomodasi ketidakpastian ini.

7.3 DISTRIBUSI PELUANG

Distribusi peluang yang disajikan hanya distribusi peluang yang kontinu yaitu normal dan lognormal karena merupakan jenis distribusi peluang yang sering digunakan dalam analisa data keandalan suatu sistem.

7.3.1 Distribusi Normal

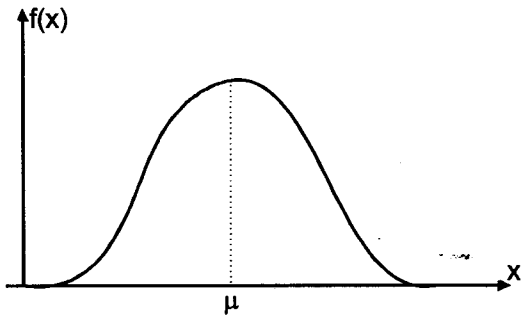
Distribusi normal pertama kali dipelajari pada abad ke-18 ketika model kesalahan (error) pengukuran yang telah diobservasi mengikuti secara simetris, distribusi berbentuk lonceng. Hal ini pertama kali disajikan secara matematik pada tahun 1733 oleh De Moivre, yang diperoleh sebagai sebuah bentuk batasan distribusi binomial. Distribusi tersebut juga diperkenalkan oleh Laplace pada tahun 1775. Meskipun menurut sejarah, hal ini telah diberi tanda oleh Gauss, yang dipublikasikan pertamakali muncul pada tahun 1809, dan istilah distribusi Gauss seringkali digunakan. Berbagai usaha telah dilakukan pada abad ke-18 dan 19 untuk menentukan distribusi ini sebagai dasar hukum probabilitas untuk seluruh jenis kontinu, maka nama normal menjadi dapat digunakan. Distribusi normal dalam beberapa hal merupakan dasar dari statistik [Hines, W.W & Montgomery,D.C(1972)].

Persamaan distribusi normal dapat ditulis sebagai berikut:

$$f(x) \quad \frac{1}{\sqrt{\sigma(2\pi)}} \mathrm{Exp}\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \qquad (1)$$

Dimana μ adalah mean dan σ^2 adalah varian.

Distribusi ini diilustrasikan secara grafik pada gambar



Gambar 7.1 Distribusi Normal

Distribusi normal digunakan secara luas . Notasi yang disingkat adalah X-N(μ,σ) sering digunakan untuk menunjukkan bahwa variabel random X adalah berdistribusi normal dengan rata-rata μ dan varian σ^2.

Beberapa sifat penting distribusi normal:

1. $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$
2. $f(x) \geq 0$ untuk seluruh X dan $\underset{x\to\infty}{Lim}\, f(x) = 0$
3. $f[(x+\mu)] = f[-(x+\mu)]$, densitas tersebut adalah simetris di sekitar μ. Karena ekor dari distribusi normal adalah simetris maka lebar ekor sebelah kiri sama dengan sebelah kanannya.
4. Nilai maksimum f terjadi pada $x = \mu$.
5. Titik perubahan dari f adalah pada $x = \mu \pm \sigma$.

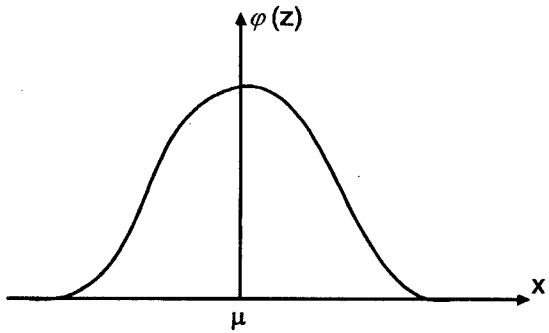
Disamping sifat-sifat di atas, sebuah alasan yang penting sehingga distribusi ini diaplikasikan secara luas adalah ketika beberapa distribusi saling interferensi tanpa mempertimbangkan bagaimana bentuk distribusinya maka hasil peluang distribusi gabungan dapat didekati dengan distribusi normal [SSC 351, 1(1990)].

Fungsi distribusi F adalah :

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{x} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)[(x-\mu)/\sigma^2]} du \qquad (2)$$

Tidak mungkin untuk menghitung integral ini tanpa menggunakan metode-metode numerik, dan seringkali penilaian ini dilakukan dengan menyelesaikan masing-masing pasangan (μ, σ^2). Meskipun hanya dengan sebuah transformasi sederhana dari variabel $z = (x-\mu)/\sigma$, menyebabkan penilaian menjadi bebas dari μ dan σ yaitu:

$$F(x) = P(X \leq x) = P\left(Z \leq \frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \int_{x}^{(x-\mu)/\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-2} dz$$
$$= \int_{-x}^{(x-\mu)/\sigma} \varphi(Z)dz = \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \qquad (3)$$



Gambar 7.2 Distribusi Normal Standar

Densitas tersebut adalah:

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) \quad -\infty < z < \infty \qquad (4)$$

mempunyai rata-rata 0 dan varian 1, yaitu Z N(0,1).

Persamaan merupakan fungsi distribusi normal seperti pada gambar.

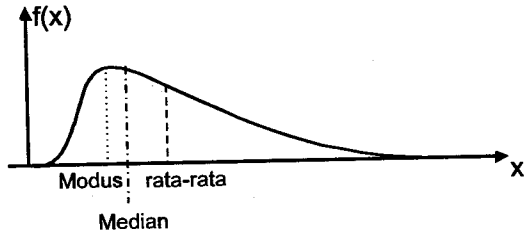
Fungsi distribusi kumulatifnya adalah:

$$\phi(Z) \quad \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) du \qquad (5)$$

7.3.2 Distribusi Lognormal

Distribusi lognormal dalam bentuk sederhana adalah fungsi densitas sebuah variabel yang logaritmanya mengikuti hukum distribusi normal. Distribusi lognormal didasarkan pada distribusi normal. Hal ini terlihat dari kombinasi random dengan sebuah proses perkalian.

Distribusi lognormal telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang termasuk ilmu fisika, ilmu jiwa, ilmu sosial dan rekayasa. Dalam penerapan rekayasa, distribusi lognormal telah digunakan untuk menggambarkan "laju kegagalan" atau rekayasa keandalan dan "laju keandalan".



Gambar 7.3 Distribusi Lognormal

Distribusi ini mempunyai daerah tajam sehingga sering lebih cocok untuk data keandalan,misalnya populasi dengan karakteristik tertentu (SSC-351[1990]). Distribusi ini muncul sebagai distribusi terbatas saat sebuah random variabel dihasilkan dari beberapa random variabel yang bebas dan terdistribusi secara identik.

Kita perhatikan sebuah variabel random X dengan range $R_x=(x<x<\infty)$, dimana Y = In (X) berdistribusi normal dengan rata-rata μ_x dan varian σ^2. Persamaan Lognormal distribusi ditulis sebagai berikut:

$$f(x)=\left\{\frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-\mu_y}{\sigma_y}\right)\right]^2\right\}_{(x<0)}^{(x\geq 0)} \qquad (6)$$

$$\mu_x=\exp(\mu_y+\sigma_y^2/2)$$

$$\sigma_x=\left[\exp(2\mu_y+2\sigma_y^2)-\exp(2\mu_y+\sigma_y^2\right]^{0.5}$$

$$\mu_y=2\ln(\mu_x)-0{,}5\ln(\sigma_x^2+\mu_x^2)$$

$$\sigma_y \quad \sqrt{\ln\frac{(\sigma_x^2+\mu_x^2)}{\mu_x^2}}$$

$$\text{Median} = \exp(\mu_y)$$

dimana μ_y dan σ_y adalah mean dan varian dalam data ln.

Jika $\mu_y >> \sigma_y$, distribusi lognormal akan mendekati distribusi normal.

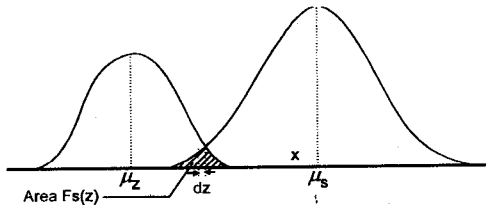
7.4 KONSEP DASAR KEANDALAN (RELIABILITY)

Secara tradisional, dalam desain suatu balok misalnya, para praktisi dan desainer menggunakan nilai-nilai yang deterministik yang kaku dalam menentukan nilai bebannya maupun kekuatan baloknya. Pada kenyataannya nilai-nilai ini bukanlah suatu harga yang unik melainkan cenderung memiliki distribusi peluang tertentu yang mencerminkan ketidakpastian yang melekat pada harga-harga beban dan kekuatan balok. Untuk mengakomodasi ketidaktahuan tersebut dipakai pendekatan angka keamanan yang biasanya menghasilkan suatu rancangan yang *Over Designed*.

Teori keandalan struktur menitikberatkan pada penilaian ketidakpastian dan metode pengkuartifikasi serta rasionalisasi dalam proses perancangan. Keandalan suatu struktur itu sendiri didefinisikan sebagai peluang struktur tersebut untuk memenuhi tujuan perancangannya dalam kondisi tertentu [Thoft-Christensen (1986)]. Untuk memperkirakan keandalan suatu struktur diperluksn perhatian setiap bentuk kegagalan yang dapat terjadi. Artinya, kita memperhatikan setiap kemungkinan bahwa struktur tersebut tidak akan bertahan pada bentuk kegagalan, selama selang waktu yang ditentukan. Ada banyak moda kegagalan, misalnya kegagalan material, stabilitas struktur, defleksi dan lain-lain dan kita dapat menentukan keandalan struktur secara terpisah untuk setiap moda kegagalan.

Hasil suatu perhitungan keandalan hanya memberikan suatu angka yang dapat diartikan sebagai peluang kegagalan ataupun sukses dari suatu sistem/struktur yang ditinjau. Maksudnya disini adalah bahwa untuk menentukan suatu sistem/struktur tersebut laik atau tidak berdasarkan angka keandalan sangat bersifat subjektif, bergantung pada perancangannya, konsultan, owner , biro klasifikasi atau pihak yang berkepentingan.

Sebuah contoh yang sederhana, gambar 4 memperlihatkan fungsi kerapatan peluang (*Probability Density factor; pdf*) untuk variabel beban (Z) dan kekuatan (S).



Gambar 7.4 Interferensi 2 Distribusi Peluang (Beban-Kekuatan)

Kita tetapkan suatu fungsi sederhana $g(s,z)$ yang disebut fungsi keadaan batas, yang menerangkan batas aman *(safety margin;* SM) antara kekuatan balok dan beban yang bekerja, yaitu:

$$SM = g(s,z) = S - Z \tag{7}$$

S dan Z adalah variabel acak dan dapat diasumsikan mempunyai distribusi peluang tertentu. Beberapa keadaan berikut menerangkan kemungkinan yang dapat terjadi pada *beam* tersebut:

1. $SM = g(s,z) \leq 0$; Keadaan dimana *beam* mengalami kegagalan, artinya beban Z melebihi kekuatan S.
2. $SM = g(s,z) > 0$; Keadaan aman, artinya beban Z lebih kecil dari kekuatan S.
3. $SM = g(s,z) = 0$; Keadaan dimana batas antara keadaan aman dan gagal.

Peluang keggalan pada keadaan (1) dapat diterangkan secara sederhana sebagai berikut:

Perhatikan pada gambar 4, bahwa peluang harga Z akan berada pada interval $dz,(z\text{-}dz/2;z+dz/2)$ adalah$fz(z)dz$. Kegagalan akan terjadi jika kekuatan S lebih kecil dari harga Z dan peluang kejadian ini adalah $\int_0^\infty fz(z)dz$ atau fungsi distribusi kumulatif (*Comulative Distribution Function; cdf*) kekuatan balok pada nilai Z_1 $F_s(Z)$. Dengan memakai persamaan diatas maka peluang kejadiannya adalah $F_s(Z)f_s(z)dz$, untuk total peluang kejadian P_f adalah:

$$Pf = \int_0^\infty F_z(Z)\, f_z(Z)dz \tag{8}$$

7.5 METODE MEAN VALUE FIRST ORDER SECOND MOMENT (MVFOSM)

Jika z adalah sebuah random variabel yang menyatakan beban yang bekerja dan S adalah sebuah random variabel yang menyatakan kekuatan material dan safety margin (SM) ditentukan sebagai berikut:

$$M = S - Z$$

Kegagalan akan terjadi saat beban Z yang bekerja melebihi kapasitas ultimat S, pada saat itu batas M bernilai negatif. Oleh karena itu probabilitas kegagalan P_f adalah:

$$P_f = P[|M \leq 0|F_m(0)] \tag{9}$$

Jika beban Z dan kekuatan S merupakan variabel bebas maka harga rata-rata (*mean*) μ_m dan σ_m dari safety margin (SM) adalah :

$$\mu_m = \mu_\Sigma - \mu_z$$
$$\sigma_m = \mu_\Sigma^2 - \sigma_z^2$$

Standardisasi G, yang mempunyai nilai *mean* nol dan sebuah standar deviasi, dapat ditulis sebagai

$$G = \frac{M - \mu_m}{\sigma_m} \tag{10}$$

Kegagalan terjadi pada saat $M \leq 0$, sehingga persamaan diatas dapat ditulis:

$$G = -\frac{\mu_m}{\sigma_m} = -\frac{\mu_s - \mu_z}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_z^2}} \tag{11}$$

dan persamaan P_f dapat ditulis ;

$$P_f = F_M(0) = F_G\left[\frac{-\mu_m}{\sigma_m}\right] = F_G(-\beta) \tag{12}$$

dimana $\beta = \frac{\mu_m}{\sigma_m}$ indeks keamanan (*safety indeks*), yang merupakan invers dari koefisien variasi dari safety margin.

Dari hasil sebelumnya dapat digeneralisasikan sebagai berikut :
Tentukan fungsi keadaan batas $g(.)$ misalnya:

$$M = g(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n)$$

dimana x_i adalah variabel acak. Keadan batas yang diizinkan agar tidak terjadi kegagalan adalah

$$M = g(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n) < 0$$

Fungsi keadaan batas ini dapat dikembangkan dengan menggunakan Taylor's series, dan jika hanya orde pertama yang diambil kita peroleh

$$g(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n) = g(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \ldots, x_n^*) + \sum_j (x_j - x_j^*)\left(\frac{\delta_g}{\delta_{x_j}}\right)x^*$$

dimana x_j^* adalah titik linierisasi (*Linearization Point*), dan turunan parsial dievaluasi di titik ini. Pada metode MVFSOM titik linierisasi ditentukan pada nilai mean $\left(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \ldots \overline{x_n}\right)$.
Mean dan variansi dari M didekati dengan

$$\mu_m \cong g\left(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \ldots \overline{x_n}\right) \tag{13}$$

$$\sigma_m^2 \cong \sum_i \sum_j \left(\frac{\delta_g}{\delta_{x_i}}\right)_{xi}\left(\frac{\delta_g}{\delta_{x_j}}\right)_{xj} \rho_{(xi,xj)}\sigma_{xi}\sigma_{xj} \tag{14}$$

dimana $\rho(xi,xj)$ adalah koefisien korelasi.

Akurasi dari persamaan-persamaan tersebut bergantung pada pengaruh dipenggalnya orde yang lebih tinggi pada persamaan.

Jika variabel xi merupakan variabel bebas maka persamaan itu dapat ditulis

$$\sigma_m^2 \cong \sum_i (\delta_g \delta_{xi})_{xi} \sigma_{xi}^2$$

Sebagai contoh, jika batas SM dinyatakan dengan dua variabel S dan Z maka

$$SM = g(x_1, x_2) = g(S, Z) = S - Z \tag{15}$$

Metode ini disebut metode MVFSOM karena linierisasi fungsi batas menggunakan tempat pada nilai mean (*Mean Value*; MV), dan hanya orde pertama (*First Orde*;FO) dari Taylor's series yang diambil dan hanya sampai pada momen kedua (*Second Moment*; SM) dari variabel randomnya (mean dan variansi) yang dipakai untuk menghitung keandalan, tidak memakai seluruh distribusi probabilitasnya.

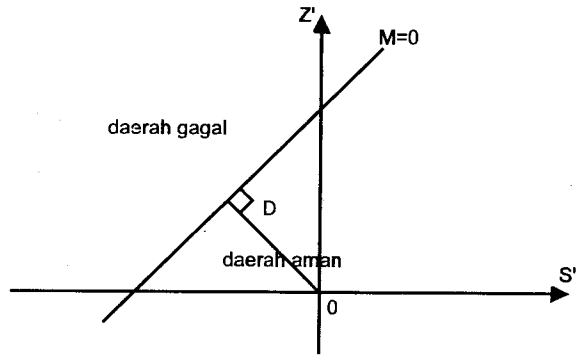
Interpretasi secara geometrik adalah sebagai berikut :

Tentukan safety margin $SM = S - Z$ dimana S adalah kekuatan material dan Z adalah beban yang bekerja. S dan Z variabel random bebas yang terdistribusi normal sehingga standardisasi dapat ditulis

$$S' = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \quad ; \quad Z' = \frac{z - \mu_z}{\sigma_z}$$

$SM = 0$ dapat ditulis :

$$SM = \sigma_S S' - \sigma_Z + \mu_S + \mu_Z = 0$$



Gambar 7.5 Fungsi Batas Linier

Jarak terpendek antara titik O dengan garis $SM = 0$ adalah D :

$$D = \frac{\mu_s - \mu_z}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_z^2}} \tag{16}$$

Jika $\beta = D$ untuk kasus fungsi batas yang linier. Jarak antara titik O dengan garis $SM = 0$ dapat digunakan sebagai ukuran keandalan.

Metode MVFOSM ini mempunyai tiga kekurangan [SSC-351(1990)]:

Pertama, jika fungsi batas $g(.)$ tidak linier dan linierisasi pada nilai mean dari x_i, kesalahan mulai terjadi pada pertambahan jarak dari titik linierisasi karena pengabaian orde yang lebih tinggi.

Kedua, metode ini tidak mampu menghasilkan nilai yang sama untuk pengambilan fungsi batas yang berbeda pada persoalan yang sama. Jadi indeks keandalan β bergantung pada bagaimana formulasi fungsi keadaan batas.

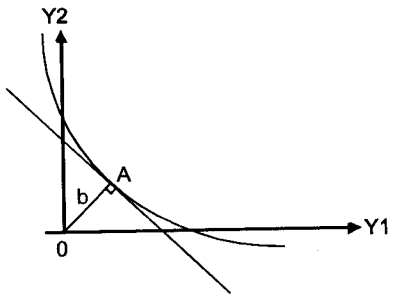
Ketiga, pada metode MVFOSM indeks keandalan β dapat dihubungkan dengan probabilitas kegagalan jika variabel x_i terdistribusi normal (dari fungsi $g(.)$ adalah linier dalam x_i).

7.6 INDEKS KEANDALAN HASOFER DAN LIND

Kekurangan pertama dan kedua metode MVFOSM dapat dihindari dengan menggunakan cara yang diberikan Hasofer dan Lind. Prosedur yang dikembangkan oleh Hasofer dan Lind yaitu variabel x_i (variabel pada fungsi batas) ditransformasikan ke distribusi normal standar:

$$y_i = \frac{x_i - \overline{x_i}}{\sigma_{xi}}$$

Indeks keandalan Hasofer dan Lind didefinisikan sebagai jarak terpendek dari titik pusat O ke permukaan bidang kegagalan pada sistem koordinat variabel-variabel normal standar. Pada Gambar 7.6, indeks keandalan sama dengan jarak OA. Titik A disebut *design point*.



Gambar 7.6 Fungsi Batas Tak Linier

Untuk memperoleh titik A dapat dilakukan dengan menyelesaikan persamaan-persamaan berikut:

$$G = (y_1^*, y_2^*, y_3^*, \ldots y_n^*) = 0$$

$$y_1^* = -\alpha_i^* \beta$$

$$\alpha_i^* = \frac{\left(\frac{\delta}{\delta}\right)_{yi}}{\sqrt{\Sigma\left(\frac{\delta G}{\delta yi}\right)^2_{yi}}}$$

Prosedur ini diajukan oleh Hasofer dan Lind disebut Advanced First Order Second Moment (AFOSM) method.

Prosedur AFOSM dapat diringkas sebagai berikut :

1. Tentukan *Failure Function* untuk moda kegagalan yang ditinjau
2. Karakteristik perubah-perubah dasarnya , x_i
3. Transformasikan perubah dasar tersebut menjadi perubah acak baku (z_j)
4. Definisikan unit vektor α_j sehingga $z_j = \beta\alpha_j$
5. Tulis kembali M sebagai fungsi dari $\beta\alpha_j$
6. Dengan persamaan M dan $\beta\alpha_j$ dan dua persamaan berikut:

$$\alpha_j = -\frac{1}{K}\left(\frac{\delta \cdot (\mathrm{M})}{\delta z_j}\right) j = 1,2,\ldots n$$

$$K = \left[\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\delta \cdot (\mathrm{M})}{\delta z_j}\right)^2\right]^{0.5}$$

7. Tentukan α_1 , α_2 ... α_j percobaan dan β percobaan dimana:
   α = β faktor kepekaan
   β = indeks keandalan
   M = margin keselamatan

8. Hitung α_j dan $\beta\alpha_j$ yang baru dengan proses iterasi sampai konvergen.

7.7 SIMULASI DAN METODE MONTE CARLO

7.7.1 Konsep Umum

Secara umum, simulasi adalah sebuah cara untuk mengadakan eksperimen di laboratorium atau pada komputer digital dengan tujuan untuk memodelkan perilaku dari suatu sistem. Biasanya model simulasi menghasilkan data simulasi yang harus dianalisa secara sistematik untuk memprediksi perilaku sistem pada waktu mendatang.

Nama metode Monte Carlo pertama kali diperkenalkan pada tahun 1944 oleh Von Newman dan Ulam sebagai nama kode untuk proyek rahasia tentang difusi netron di Laboratorium Los Alamos. Simulasi Monte Carlo biasanya digunakan untuk persoalan-persoalan yang menyangkut perubah-perubah random yang telah diketahui atau diasumsikan distribusi peluangnya. Dengan menggunakan sampling statistik, suatu set variabel random dibangkitkan sesuai dengan distribusi peluangnya. Kemudian nilai-nilai diperlakukan sama seperti sampel hasil pengamatan eksperimen dan digunakan untuk memperoleh sebuah solusi sampel. Dengan mengulangi proses dan membangkitkan beberapa set sampel data, banyak solusi sampel dapat ditentukan, kemudian dilakukan analisa secara statistik terhadap solusi ampel.

Metode Monte Carlo mempunyai 3 langkah dasar :

1. Pensimulasian perubah-perubah random dan pembangkitan beberapa data sampel menggunakan teknik sampling statistik.
2. Solusi dengan menggunakan data sampel.
3. Analisa secara statistik dari hasil-hasil tersebut.

Karena hasil dari teknik ini bergantung pada banyaknya sampel yang dipakai, maka kesalahan sampling sangat bersifat subjektif dan tidak dapat ditentukan secara eksak.

7.7.2 Penggunaan Simulasi Monte Carlo pada Analisa Keandalan Struktur

Keandalan suatu struktur dapat diungkapkan dengan suatu fungsi keadaan batas (*Limit State*) $g(x) = g(x_1, x_2, x_3, \ldots x_n)$ dimana x_i adalah perubah-perubah dasar random. Pertidaksamaan $g(x) < 0$ menyatakan keadaan gagal dan $g(x) > 0$ menyatakan aman. Pendekatan dengan menggunakan simulasi Monte Carlo, sebuah sampel random yang berisikan nilai dari perubah dasar dibangkitkan secara numerik sesuai dengan distribusi peluangnya. Angka angka

random tersebut disubstitusikan ke dalam fungsi keadaan batas kemudian dihitung. Dilihat apakah bernilai positif atau negatif (i.e. aman atau gagal). Dengan mengulangi proses ini berulang-ulang maka kita dapat mensimulasikan distribusai peluang dari $g(x)$.

Langkah - langkah penggunaan metode Simulasi Monte Carlo adalah sebagai berikut :

- Ambil beberapa angka acak x_i(sebanyak jumlah perubah dasar pada persamaan moda kegagalan yang pada kasus ditinjau) dari random *number generator* dengan $0<x_i<1$.
- Transformasikan distribusi peluang x_i (uniform) menjadi z sesuai dengan peluangnya menurut fungsi kerapatan peluangnya.
- Masukkan z pada persamaan M
- Hitung M
- Bila $M<0$ tetapkan NFAIL=FAIL+1
- Ulangi percobaan hingga NEXP yang diminta
- Untuk percobaan sebanyak NEXP bila kejadian ($M<0$), maka peluang terjadinya kegagalan P_f = NFAIL/NEXP
- Keandalan sistem adalah R = 1-NFAIL/NEXP

BAB 8
APLIKASI PENGGUNAAN ANALISA KEANDALAN METODE AFOSM UNTUK KASUS KEKUATAN KAPAL

8.1 PENDAHULUAN

Untuk mengetahui struktur lambung kapal yang dianalisa maka kita harus mengetahui ukuran utama dari kapal tanker 17.500 DWT yang akan ditinjau dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Length Over All : 160.00 M
- Length Between perpendicular : 154.00 M
- Breadth Moulded : 26.80 M
- Depth Moulded : 11.50 M
- Draft Design Moulded : 7.00 M
- Coefficien Block : 0.828

Prosedur perhitungan keandalan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

8.2 PENETAPAN MODA KEGAGALAN/ KEADAAN BATAS (LIMIT STATE)

Dalam permasalahan ini moda kegagalan yang dipakai yaitu jika beban momen bending air tenang dan gelombang melewati kapasitas momen bending ultimat dari lambung kapal dan diformulasikan:

Kapasitas Bending Momen Ultimat kondisi *sagging*:

$$BM_{US} = -A_D(D-g)\sigma_{uD} - \frac{A_S(D-H)(D+H-2g)\sigma_{uS}}{D} - A_B g\sigma_{yB} + \frac{A'_B(g-D_B)[D_B\sigma_{uS} - (H-D_B)\sigma_{yS}]}{D} - \frac{A_S H[(2H-3g)\sigma_{uS} - (H-3g)\sigma_{yS}]}{3D} \quad (1)$$

Kapasitas Bending Momen Ultimat kondisi *hogging*:

$$BM_{UH} = A_D g\sigma_{yD} + A_B(D-g)\sigma_{uB} + A'_B(D-g-D_B)\sigma'_{uB} + \frac{A_S[(D-H)(D+H-2g)\sigma_{uS}]}{D} + \frac{A_S H[(2H-3g)\sigma_{uS} - (H-3g)\sigma_{yS}]}{3D} \quad (2)$$

Dimana :
- A_B = Total sectional area bottom
- A_S = Setengah total sectional area sisi (termasuk longitudinal bulkhead)
- A_D = Total sectional area deck
- A'_B = Total sectional area inner bottom
- g = Letak netral aksis
- D = Sarat kapal
- H = Tinggi kapal
- D_B = Tinggi double bottom
- $\sigma_{uB}, \sigma'_{uB}, \sigma_{uD}, \sigma_{uS}$ = Ultimate buckling strength bottom, Inner bottom, deck dan sisi.
- $\sigma_{yB}, \sigma_{yB}, \sigma_{yB}, \sigma_{yB}$ = Yield strength bottom, inner bottom, deck dan sisi.

Selanjutnya moda kegagalan dapat diformulasikan :

$$SM \le BM_{u,c} - M_{SW} - M_W \quad (3)$$

dimana
- SM : Moda kegagalan
- $BM_{u,c}$: Kapasitas momen bending ultimat
- M_{SW} : Momen di air tenang
- M_W : Momen di air gelombang

karena :
- $M_{SW} = C_{st} L^{2.5} B(C_b+0.5)$
- $M_W = C_2 L^2 BHK_b$ (hogging M_w [+] dan untuk sagging M_w [-])

maka dapat ditulis :

- *Kondisi hogging*

  $SM = BM_{u,c} - M_{SW} - M_W$

  $SM = BM_{u,c} - C_{st} L^{2.5} B(C_b+0.5) - C_2 L^2 BHK_b$

  dan : $A_1 = L^{2.5} B(C_b+0.5)$ dan $A_2 = L^2 B$ maka ditulis:

  $SM = BM_{u,c} - A_1 C_{st} - A_2 C_2 HK_b$

- *Kondisi sagging*

  $SM = BM_{u,c} - M_{SW} - M_W$

  $SM = BM_{u,c} - C_{st} L^{2.5} B(C_b+0.5) + C_2 L^2 BHK_b$

  dan : $A_1 = L^{2.5} B(C_b+0.5)$ dan $A_2 = L^2 B$ maka ditulis :

  $SM = BM_{u,c} - A_1 C_{st} + A_2 C_2 HK_b$

Dimana $BM_{u,c}$ adalah kapasitas momen bending ultimat lambung kapal, C_{st} (Momen bending air tenang) koefisien yang merupakan fungsi panjang kapal (L), C_2 dan K_b(Momen bending gelombang) adalah koefisien yang merupakan fungsi C_b , C_b adalah koefisien blok , L adalah panjang kapal dan B adalah lebar kapal.

8.3 PENENTUAN DAN KARAKTERISASI PERUBAH-PERUBAH DASAR (*BASIC VARIABLE*)

Seluruh komponen perubah dasar kekuatan dan beban yang terdapat pada persamaan dianggap sebagai perubah dasar (kecuali konstanta A_1 dan A_2), dan seluruhnya dari perubah dasar tersebut dimodelkan dengan fungsi distribusi peluang tertentu.

Pada kondisi ini kapal sedang dalam perjalanan dengan kapasitas penumpang, muatan dan pembekalan 100 %. Pada kondisi ini kapal akan terpengaruh oleh beban gelombang sehingga momen bending yang terjadi adalah jumlah dari momen bending air tenang dan momen bending gelombang.

8.3.1 Kapasitas Momen Bending Ultimat ($BM_{u,c}$)

Untuk menentukan besar dari kapasitas momen bending ultimat, digunakan formula dari A.E Mansour dan J.K Paik. Kapasitas momen bending ultimat dihitung dalam dua kondisi yaitu kondisi *hogging* dan kondisi *sagging*.

Besarnya kapasitas ultimat itu selain bergantung pada *midship section* kapal juga bergantung pada kekuatan material (yield dan ultimat buckling), dan kebanyakan referensi menyarankan kita memakai pendekatan distribusi normal untuk kekuatan material. Untuk itu kapasitas momen bending ultimat memakai pendekatan distribusi normal.

8.3.2 Koefisien C_{st}

Untuk besar beban di air tenang kita gunakan perhitungan momen bending di air tenang sebagai berikut:

$$M_{SW} = C_{st} L^{2.5} B(C_b + 0.5)$$

$$C_{st} = \left[0.564 + \frac{160 - L}{925}\right] 10^{-2}$$

$$C_{st} = \left[0.564 + \frac{160 - 154}{925}\right] 10^{-2}$$

$$= (0.564 + 0.0065) 10^{-2}$$

$$= 0.0057$$

Disribusi peluang bending momen di air tenang memakai pendekatan distribusi normal, maka koefisien C_{st} memakai pendekatan distribusi normal.

8.3.3 Koefisien C_2

Untuk besar beban di air gelombang kita gunakan perhitungan momen bending di air gelombang sebagai berikut:

$$MW = C_2 L^2 BHK_b$$

$$C_2 = \left[2.34 C_b + 0.2\right] 10^{-2}$$

$$C_2 = \left[2.34 \times 0.828 + 0.2\right] 10^{-2}$$

$$= 0.021375$$

Distribusi peluang koefisien C_2 memakai pendekatan distribusi normal.

8.3.4 Tinggi Gelombang (H)

Untuk besar beban di air gelombang kita gunakan perhitungan momen bending di air gelombang sebagai berikut:

$$MW = C^2 L^2 BHK_b$$

$$H = 0.0181\text{L} + 3.516$$

$$= 0.0181 \text{ x } 154 + 3.516$$

$$= 6.3034 \text{ m}$$

Distribusi peluang tinggi gelombang (H) memakai pendekatan distribusi normal.

8.3.5 Koefisien K_b

Untuk besar beban di air gelombang kita gunakan perhitungan momen bending di air gelombang sebagai berikut:

$$M_W = C_2 L^2 BHK_b$$

$$K_b = 1$$

Distribusi peluang koefisien K_b memakai pendekatan distribusi normal.

Karakteristik dari perubah dasar ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 8.1 Karakterisasi Perubah Dasar

Perubah Dasar	Mean (μ)	COV	Tipe Distribusi
$BM_{u,c}$	Bervariasi	10 %	Normal
Koefisien C_{st}	0,0057	40 %	Normal
Koefisien C_2	0,021375	10 %	Normal
Tinggi Gel (H)	Bervariasi	40 %	Lognormal
Koefisien K_b	1	10 %	Normal

8.4 PERHITUNGAN KEANDALAN DENGAN METODE ADVANCED FIRST ORDER SECOND MOMEN

1. Normalisasi Perubah Dasar

   Normalisasi perubah dasar ($BM_{u,c}$, C_{st}, C_2 , H, K_b) sebagai deterministik:

   - Kapasitas bending momen ultimat lambung kapal : $BM_{u,c}$

$$z_1 = \frac{BM_{u,c} - \mu_{BM_{u,c}}}{\sigma_{BM_{u,c}}}$$

$$BM_{u,c} = z_1 \sigma_{BM_{u,c}} + \mu_{BM_{u,c}}$$

- Koefisien C_{st} untuk momen bending di air tenang:

$$z_2 = \frac{C_{st} - \mu_{C_{st}}}{\sigma_{C_{st}}}$$

$$C_{st} = z_2\sigma_{C_{st}} + \mu_{C_{st}}$$

- Koefisien C_2 untuk momen bending gelombang:

$$z_3 = \frac{C_2 - \mu_{C_2}}{\sigma_{C_2}}$$

$$C_2 = z_3\sigma_{C_2} + \mu_{C_2}$$

- Tinggi gelombang (H) :

$$z_4 = \frac{H - \mu_H}{\sigma_H}$$

$$H = z_4\sigma_H + \mu_H$$

- Koefisien K_b untuk momen bending gelombang:

$$z_5 = \frac{K_b - \mu_{K_b}}{\sigma_{K_b}}$$

$$K_b = z_5\sigma_{K_b} + \mu_{K_b}$$

2. Fungsi bidang batas (*Gailur Surface*) pada sistem koordinat :

- *Kondisi hogging*:

$$BM_{u,c} - A_1C_{st} - A_2C_2HK_b = 0$$

Substitusi semua perubah dasar yang telah dinormalisasikan kedalam persamaan fungsi batas:

$$F(z_i) = (z_1\sigma_{BM_{u,c}} + \mu_{BM_{u,c}}) - A_1(z_2\sigma_{C_{st}} + \mu_{C_{st}})$$
$$- A_2[(z_3\sigma_{C_2} + \mu_{C_2}) \times (z_4\sigma_H + \mu_H) \times (z_5\sigma_{K_b} + \mu_{K_b})]$$

atau

$$F(z_i) = (z_1\sigma_1 + \mu_1) - A_1(z_2\sigma_2 + \mu_2)$$
$$- A_2[(z_3\sigma_3 + \mu_3) \times (z_4\sigma_4 + \mu_4) \times (z_5\sigma_5 + \mu_5)]$$

atau

$$F(z_i) = z_1\sigma_1 + \mu_1 - A_1(z_2\sigma_2 + \mu_2)$$
$$- A_2[z_3\sigma_3 z_4\sigma_4 z_5\sigma_5 + z_3\sigma_3 z_5\sigma_5\mu_4 \times z_4\sigma_4 z_5\sigma_5\mu_5 \times z_3\sigma_3 z_4\sigma_4\mu_5$$
$$+ \mu_3\mu_4 z_5\sigma_5 + \mu_4\mu_5 z_3\sigma_3 + \mu_3\mu_5 z_4\sigma_4 + \mu_3\mu_4\mu_5]$$

- *Kondisi sagging*:

$$BM_{u,c} - A_1C_{st} + A_2C_2HK_b = 0$$

Substitusi semua perubah dasar yang telah dinormalisasikan kedalam persamaan fungsi batas:

$$F(z_i) = (z_1\sigma_{BM_{u,c}} + \mu_{BM_{u,c}}) - A_1(z_2\sigma_{C_{st}} + \mu_{C_{st}})$$
$$+ A_2[(z_3\sigma_{C_2} + \mu_{C_2}) \times (z_4\sigma_H + \mu_H) \times (z_5\sigma_{K_b} + \mu_{K_b})]$$

atau

$$F(z_i) = (z_1\sigma_1 + \mu_1) - A_1(z_2\sigma_2 + \mu_2)$$
$$+ A_2[(z_3\sigma_3 + \mu_3) \times (z_4\sigma_4 + \mu_4) \times (z_5\sigma_5 + \mu_5)]$$

atau

$$F(z_i) = z_1\sigma_1 + \mu_1 - A_1(z_2\sigma_2 + \mu_2)$$
$$+ A_2[z_3\sigma_3 z_4\sigma_4 z_5\sigma_5 + z_3\sigma_3 z_5\sigma_5\mu_4 + z_4\sigma_4 z_5\sigma_5\mu_5 + z_3\sigma_3 z_4\sigma_4\mu_5$$
$$+ \mu_3\mu_4 z_5\sigma_5 + \mu_4\mu_5 z_3\sigma_3 + \mu_3\mu_5 z_4\sigma_4 + \mu_3\mu_4\mu_5]$$

3. Menentukan unit vektor β sehingga $Z_i = \beta\alpha_i$

$$BM_{u,c} = \beta\alpha_1\sigma_{BM_{u,c}} + \mu_{BM_{u,c}}$$

$$C_{st} = \beta\alpha_2\sigma_{C_{st}} + \mu_{C_{st}}$$

$$C_2 = \beta\alpha_3\sigma_{C_2} + \mu_{C_2}$$

$$H = \beta\alpha_4\sigma_H + \mu_H$$
$$K_h = \beta\alpha_5\sigma_{K_h} + \mu_{K_h}$$

4. Fungsi batas ditulis kembali sebagai fungsi dari $\beta\alpha_i$

- *Kondisi hogging* :

$$F(\beta\alpha_i) = \beta\alpha_1\sigma_1 + \mu_1 - A_1(\beta\alpha_2\sigma_2 + \mu_2) - A_2[\beta\alpha_3\sigma_3\beta\alpha_4\sigma_4\beta\alpha_4\sigma_4 + \beta\alpha_3\sigma_3\beta\alpha_5\sigma_5\mu_4 + \beta\alpha_4\sigma_4\beta\alpha_5\sigma_5\mu_3 + \beta\alpha_3\sigma_3\beta\alpha_4\sigma_4\mu_5 + \beta\alpha_3\sigma_3\mu_4\mu_5 + \beta\alpha_4\sigma_4\mu_3\mu_5 + \beta\alpha_5\sigma_5\mu_3\mu_4 + \mu_3\mu_4\mu_5] = 0$$

- *Kondisi sagging* :

$$F(\beta\alpha_i) = \beta\alpha_1\sigma_1 + \mu_1 - A_1(\beta\alpha_2\sigma_2 + \mu_2) + A_2[\beta\alpha_3\sigma_3\beta\alpha_4\sigma_4\beta\alpha_4\sigma_4 + \beta\alpha_3\sigma_3\beta\alpha_5\sigma_5\mu_4 + \beta\alpha_4\sigma_4\beta\alpha_5\sigma_5\mu_3 + \beta\alpha_3\sigma_3\beta\alpha_4\sigma_4\mu_5 + \beta\alpha_3\sigma_3\mu_4\mu_5 + \beta\alpha_4\sigma_4\mu_3\mu_5 + \beta\alpha_5\sigma_5\mu_3\mu_4 + \mu_3\mu_4\mu_5] = 0$$

5. Menghitung indeks keandalan(β) dengan menyelesaikan persamaan-persamaan berikut :

- *Kondisi hogging* :

$$\beta = \mu_1 - A_1\mu_2 - A_2\mu_3\mu_4\mu_5 /(-\sigma_1\alpha_1 + A_1\sigma_2\alpha_2 + A_2[\alpha_3\alpha_4\alpha_5\sigma_3\alpha_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_3\alpha_5\sigma_3\sigma_5\mu_4\beta + \alpha_3\alpha_4\alpha_3\sigma_4\mu_5\beta + \alpha_4\alpha_5\sigma_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_5\sigma_5\mu_3\mu_4 + \alpha_3\sigma_3\mu_4\mu_5 + \alpha_4\sigma_4\mu_3\mu_5])$$

$$\alpha_j = \frac{1}{K}\left(\frac{\delta(SM)}{\delta z_j}\right) \qquad j = 1,2,...n$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{K}\sigma_1$$

$$\alpha_2 = -\frac{1}{k}(-A_1\sigma_2)$$

$$\alpha_3 = -\frac{1}{K}(-A_2(\alpha_4\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_5\alpha_3\sigma_5\mu_4\beta + \alpha_4\alpha_3\sigma_4\mu_5\beta + \alpha_3\mu_4\mu_5))$$

$$\alpha_4 = -\frac{1}{K}(-A_2(\alpha_3\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_5\alpha_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_3\alpha_3\sigma_4\mu_5\beta + \alpha_4\mu_3\mu_5))$$

$$\alpha_5 = -\frac{1}{K}(-A_2(\alpha_3\alpha_4\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_4\alpha_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_3\alpha_3\sigma_5\mu_4\beta + \alpha_5\mu_3\mu_4))$$

$$K = \left[\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\delta\cdot(SM)}{\delta z_j}\right)^2\right]^{0.5}$$

atau

$$K = [\sigma_1^2 + (-A_1\sigma_2)^2 + \{-A_2(\alpha_4\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_5\alpha_3\sigma_5\mu_4\beta + \alpha_4\alpha_3\sigma_4\mu_5\beta + \sigma_3\mu_4\mu_5)\}^2 + \{-A_2(\alpha_3\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_5\alpha_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_3\alpha_3\sigma_4\mu_5\beta + \sigma_4\mu_3\mu_5)\}^2 + \{-A_2(\alpha_3\alpha_4\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_4\alpha_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_3\alpha_3\sigma_5\mu_4\beta + \sigma_5\mu_3\mu_4)\}^{0.5}$$

- *Kondisi sagging* :

$$\beta = \mu_1 - A_1\mu_2 + A_2\mu_3\mu_4\mu_5 /(-\sigma_1\alpha_1 + A_1\sigma_2\alpha_2 - A_2[\alpha_3\alpha_4\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_3\alpha_5\sigma_3\sigma_5\mu_4\beta + \alpha_3\alpha_4\sigma_3\sigma_4\mu_5\beta + \alpha_4\alpha_5\sigma_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_5\sigma_5\mu_3\mu_4 + \alpha_3\sigma_3\mu_4\mu_5 + \alpha_4\sigma_4\mu_3\mu_5])$$

$$\alpha_j = -\frac{1}{K}\left(\frac{\delta\cdot(SM)}{\delta z_j}\right) \qquad j = 1,2,...n$$

$$\alpha_1 = -\frac{1}{k}\sigma_1$$

$$\alpha_2 = -\frac{1}{k}(-A_1\sigma_2)$$

$$\alpha_3 = -\frac{1}{k}A_2(\alpha_4\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_5\sigma_3\sigma_5\mu_4\beta + \alpha_4\sigma_3\sigma_4\mu_5\beta + \sigma_3\mu_4\mu_5)$$

$$\alpha_4 = -\frac{1}{k}A_2(\alpha_3\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_5\sigma_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_3\sigma_3\sigma_4\mu_5\beta + \sigma_4\mu_3\mu_5)$$

$$\alpha_5 = \frac{1}{k}A_2(\alpha_3\alpha_4\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_4\sigma_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_3\sigma_3\sigma_5\mu_4\beta + \sigma_5\mu_3\mu_4)$$

$$K = \left[\sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\delta \cdot (SM)}{\delta z_j} \right)^2 \right]^{0.5}$$

atau

$$K = [\sigma_1^2 + (-A_1\sigma_2)^2$$
$$+ \{A_2(\alpha_4\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_5\sigma_3\sigma_5\mu_4\beta + \alpha_4\sigma_3\sigma_4\mu_5\beta + \sigma_3\mu_4\mu_5)\}^2$$
$$+ \{A_2(\alpha_3\alpha_5\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_5\sigma_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_3\sigma_3\sigma_4\mu_5\beta + \sigma_4\mu_3\mu_5)\}^2$$
$$+ \{A_2(\alpha_3\alpha_4\sigma_3\sigma_4\sigma_5\beta^2 + \alpha_4\sigma_4\sigma_5\mu_3\beta + \alpha_3\sigma_3\sigma_5\mu_4\beta + \sigma_5\mu_3\mu_4)\}^2]^{0.5}$$

8.5 PERHITUNGAN KAPASITAS MOMEN BENDING ULTIMAT

Langkah-langkah perhitungan adalah sebagai berikut :

1. Menghitung A_D, A_S, A_B dan A'_B

   - *menghitung A'_B (total sectional area dari dasar dalam)*

No.	Nama Bagian	Jumlah (n)	Luas (A) Penampang	A *n
1.	Pembujur Dasar/D 300 x 11	22	3300	72600
2.	Pelat Dasar/D			
	2150 x 12	2	25800	51600
	2250 x 12	4	27000	108000
	1750 x 12	2	21000	42000
	1600 x 12	2	19200	38400
	500 x 12	2	6000	12000
3.	1/2 Center Girder 900 x 13	1	11700	11700
4.	1/2 Side Girder 900 x 13	6	10800	64800
5.	Pelat 2000 x 13	2	26000	52000
6.	Pembujur 300 x 11 . HP	2	3300	6600
7.	Pembujur CG 220 x 10 . HP	1	2200	2200
			Total ;	461900 mm²

Jadi total sectional area alas dalam(A'_B): 461900 mm².

- *menghitung A_D (total sectional area dari geladak)*

No.	Nama Bagian	Jumlah (n)	Luas (A) Penampang	A *n
1.	Pembujur Geladak 280 x 12 . HP	32	3360	107520
2.	Pelat Geladak			
	2300 x 15	3	34500	103500
	2350 x 15	2	35250	70500
	2325 x 15	2	34875	69750
	1750 x 15	2	26250	52500
	1762 x 15	2	26430	52860
	1763 x 15	2	26445	52890
			Total :	509520 mm²

Jadi total sectional area geladak (A_D): 509520 mm².

- *menghitung A_B (total sectional area dari dasar)*

No.	Nama Bagian	Jumlah (n)	Luas (A) Penampang	A *n
1.	Pembujur Dasar 300 x 11 . HP	24	3300	79200
2.	Pelat Dasar			
	2360 x 13,5	2	31860	63720
	2350 x 13,5	6	31725	190350
	2596 x 13,5	2	35046	70092
3.	1/2 Center Girder 900 x 13	1	11700	11700
4.	1/2 Side Girder 900 x 12	6	10800	64800
5.	Pelat Lunas 1780 x 15,5	1	27590	27590
6.	Pembujur CG 220 x 10 . HP	1	2200	2200
			Total :	509652 mm²

Jadi total sectional area dasar (A_B): 509652 mm².

- *menghitung A_S (setengah total sectional area dari semua sisi)*

No.	Nama Bagian	Jumlah (n)	Luas (A) Penampang	A *n
1.	Pembujur Sisi			
	220 x 10 . HP	5	2200	11000
	260 x 12 . HP	4	3120	12480
	280 x 12 . HP	1	3360	3360
	300 x 11 . HP	1	3300	3300
2.	Pelat Sisi			
	1780 x 15	1	26700	26700
	2020 x 12	1	24240	24240
	2250 x 12	1	27000	27000
	2200 x 12	1	26400	26400
	1450 x 13	1	18850	18850
	1596 x 13,5	1	21552,75	21552,75
3.	Pelat Sisi Dalam			
	1754,5 x 14	1	24563	24563
	1700 x 11	1	18700	18700
	2350 x 11	2	25850	51700
	250 x 11	1	550	550
4.	Pembujur S/D			
	220 x 10 . HP	5	2200	11000
	260 x 12 . HP	4	3120	12480
5.	Sekat Memanjang			
	1750 x 14	1	24500	24500
	1400 x 11	1	15400	15400
	2350 x 11	2	25850	51700
	2350 x13	1	30550	30550
6.	Pembujur S/M			
	220 x 10 . HP	3	2200	6600
	260 x 12 . HP	3	3120	9360
	280 x 12 . HP	0,5	3360	1680
7.	Stringer			
	1480 x 11	2	16280	32560
			Total :	466225,75 mm²

Jadi setengah total sectional area sisi(A_S): 466225,75 mm².

2. Mencari perbandingan σ_u/σ_y dari masing-masing bagian (geladak, sisi, alas, dan alas dalam)

- *perbandingan $\sigma_u D/\sigma_y D$*

b	h	A =b x h	d	A x d	A x d^2	Iind
60	1,5	90	0,75	67,5	50,625	16,875
1,2	28	33,6	15,5	520,8	8072,4	2195,2
		123,6		588,3	8123,025	2212,075

z 4,759708738 cm
Ixx 10335,1 cm^4
INA 7534,96335 cm^4

jari-jari girasi (r) = 7,80784776
β = 1,356465997
α = 0,414962824
σuD/σyD = 0,809364452

- *perbandingan $\sigma_u B/\sigma_y B$*

b	h	A =b x h	d	A x d	A x d^2	Iind
54	1,35	72,9	0,675	49,2075	33,2150625	11,0716875
1,1	30	33	16,35	539,55	8821,6425	2475
		105,9		588,7575	8854,85756	2486,07169

z 5,559560907 cm
Ixx 11340,92925 cm^4
INA 8067,69607 cm^4

jari-jari girasi (r) = 8,728242108
β = 1,356465997
α = 0,371204936
σuB/σyB = 0,817003

- *perbandingan $\sigma' _u B/\sigma' _y B$*

b	h	A =b x h	d	A x d	A x d^2	Iind
48	1,2	57,6	0,6	34,56	20,736	6,912
1,1	30	33	16,2	534,6	8660,52	2475
		90,6		569,16	8681,256	2481,912

z 6,282119205 cm
Ixx 11163,168 cm^4
INA 7587,637033 cm^4

jari-jari girasi (r) = 9,151434485
β = 1,356465997
α = 0,354039201
σuB/σyB = 0,822105

- *perbandingan* $\sigma_u S/\sigma_y S$

b	h	A =bxh	d	A xd	A xd^2
48	1,2	57,6	0,6	34,56	20,736
1	22	22	12,2	268,4	3274,48
		79,6		302,96	3295,216

z = 3,806030151 cm
Ixx = 4189,461333 cm^4
INA = 3036,386439 cm^4

jari-jari girasi (r) = 6,176209054
β = 1,356465997
α = 0,524588226
σu/σy = 0,802923

b	h	A =bxh	d	A xd	A xd^2
48	1,2	57,6	0,6	34,56	20,736
1,2	26	31,2	14,2	443,04	6291,168
		88,8		477,6	6311,904

z = 5,378378378 cm
Ixx = 8076,416 cm^4
INA = 5507,702486 cm^4

jari-jari girasi (r) = 7,875511199
β = 1,356465997
α = 0,411397619
σu/σy = 0,816491

penggabungannya :
σu/σy = (A1xs1+A2xs2)/(A1+A2)
= 0,810078

3. Menghitung Kapasitas Momen Bending Ultimat

- *untuk kondisi sagging*:

A_D = 0,50952 m^2
A_S = 0,4662258 m^2
A_B = 0,509652 m^2
A'_B = 0,4619 m^2

1. Perhitungan Momen Bending Ultimat Sagging :
D = 11,5 m
D_B = 1,8 m
$\sigma_u D$ = 186,15372 MPa
$\sigma_y S$ = 230 MPa
$\sigma_u S$ = 186,31794 MPa
$\sigma_y B$ = 230 MPa
C_1 = 0,232483
C_2 = 1,7832992
H = 6,0585266 m
g = 3,347108 m
$M_u S$ = -1794,829 MNm
= -182959,1 tonm (MNm/9.81)

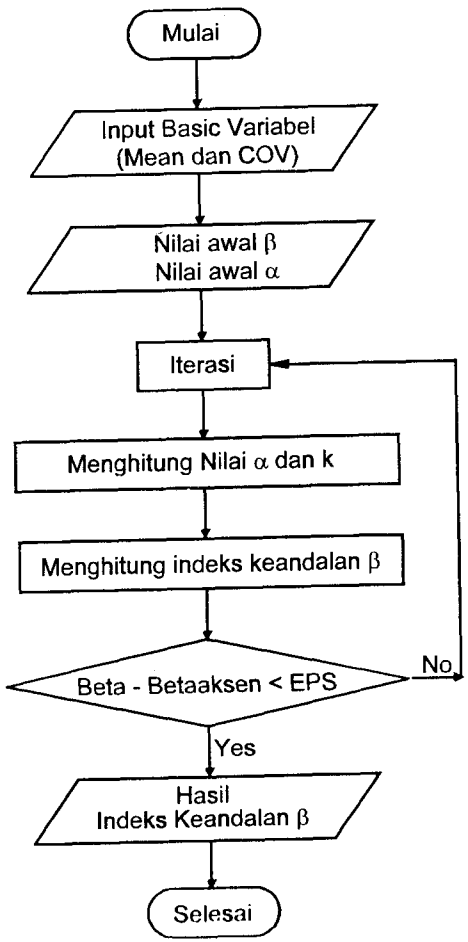
- *untuk kondisi hogging*:

A_D = 0,50952 m^2
A_S = 0,466226 m^2
A_B = 0,509652 m^2
A'_B = 0,4619 m^2

2. Perhitungan Momen Bending Ultimat Hogging :
D = 11,5 m
DB = 1,8 m
$\sigma_y D$ = 230 MPa
$\sigma_y S$ = 230 MPa
$\sigma_u S$ = 186,3179 MPa
$\sigma_u B$ = 187,9107 MPa
$\sigma'_u B$ = 189,0842 MPa
H = 7,099433 m
g = 3,92217 m
$M_u H$ = 2193,947 MNm
= 223644 tonm (MNm/9.81)

Persamaan indeks keandalan (β) diselesaikan secara iterasi dengan memasukkan harga-harga awal untuk β, α_1, α_2, α_3, α_4 dan α_5 hasilnya dicari secara manual atau dengan menggunakan program komputer. Untuk memudahkan perhitungan dan hasil yang akurat sebaiknya kita gunakan software komputer PC yang biasa digunakan seperti Fortran, Basic, Pascal under DOS ataupun bahasa visual seperti Borland Delphi, Visual Basic atau Visual C++ for Windows. Program yang kita gunakan untuk menyelesaikan persoalan ini adalah bahasa pemrograman Borland Delphi for WINDOWS.

Untuk lebih jelasnya mengenai kondisi hogging atau sagging maka dibuat Flow Chart Program (diagram alir program) sebagai berikut:



Gambar 8.1 Diagram Alir Metode AFOSM

{Listing Program Metode AFOSM Level II ---- Kekuatan Ultimat Struktur Kapal}

```
unit uinput; (input data)
interface
uses
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
    StdCtrls, Buttons;
type
    TFrmInput = class(TForm)
    Label1, Label2: TLabel;
    Input_Mean: TEdit;
    Input_Cov: TEdit;
    Label3: TLabel;
    LabIterasi: TLabel;
    btselesai: TBitBtn;
    btnext: TBitBtn;
    procedure btnextClick(Sender: TObject);
    procedure btselesaiClick(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure FormShow(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
    Index:byte;
    procedure Reset;
end;
var
    FrmInput: TFrmInput;
    ALabel:array[1..5,1..2] of string;
    K,modaaksen,betaaksen,modi,B :real;
    a1,a1aksen,a2,a2aksen,a3,a3aksen,a4,a4aksen,a5,a5aksen,x:real;
    z1,z2,z3,z4,z5:real;
    derivz1,derivz2,derivz3,derivz4,derivz5:real;
    COV1,COV2,COV3,COV4,COV5,moda:real;
    K1,K2,FF,GG,HH:real;
    S1,M1,S2,M2,S3,M3,S4,M4,S5,M5:real;
implementation
uses uhasil;
{$R * DFM}
```

```
procedure TFrmInput.btnextClick(Sender: TObject);
var
    a,b:real;
    code:integer;
  begin
  case index of
  1:begin
    m1:=a;
    cov1:=b;
     end;
   2:begin
    m2:=a;
    cov2:=b;
     end;
   3:begin
    m3:=a;
    cov3:=b;
     end;
   4:begin
    m4:=a;
    cov4:=b;
     end;
   end;
   inc(index);
   label1.caption:=alabel[index,1];
   label2.caption:=alabel[index,2];
   labiterasi.caption:=inttostr(index);
   input_mean.setfocus;
  end;
end;

procedure TFrmInput.btselesaiClick(Sender: TObject);
var
   a,b:real;
   code:integer;
begin
   if index=5 then
   begin
   val(input_mean.text,a,code);
     if code<>0 then
     begin
       exit;
     end;
```



```
   val(input_cov.text,b,code);
   if code<>0 then
   begin
     exit;
   end;
m5:=a;
  cov5:=b;
  K1:=10474533.04;K2:=635588.8;
  S1:=COV1*M1;S2:=COV2*M2;S3:=COV3*M3;S4:=COV4*M4;S5:=COV5*M5;
  FrmHasil.show;
  end;
end;

procedure TFrmInput.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  ALabel[1,1]:='Mean Kapasitas Ultimate BM';
  ALabel[1,2]:='COV Kapasitas Ultimate BM';
  ALabel[2,1]:='Mean Koefisien Cst';
  ALabel[2,2]:='COV Koefisien Cst';
  ALabel[3,1]:='Mean Koefisien C2';
  ALabel[3,2]:='COV Koefisien C2';
  ALabel[4,1]:='Mean Tinggi Gelombang';
  ALabel[4,2]:='COV Tinggi Gelombang';
  ALabel[5,1]:='Mean Koefisien Kb';
  ALabel[5,2]:='COV Koefisien Kb';
end;

procedure TFrmInput.Reset;
begin
  Index:=1;
  labiterasi.caption:=IntToStr(Index);
  label1.caption:=alabel[1,1];
  label2.caption:=alabel[1,2];
  Input_Mean.Setfocus;
end;

procedure TFrmInput.FormShow(Sender: TObject); {masuk ke formhasil}
begin
 reset;
end;
end.
```

unit uhasil; **(proses iterasi dan hasilnya)**

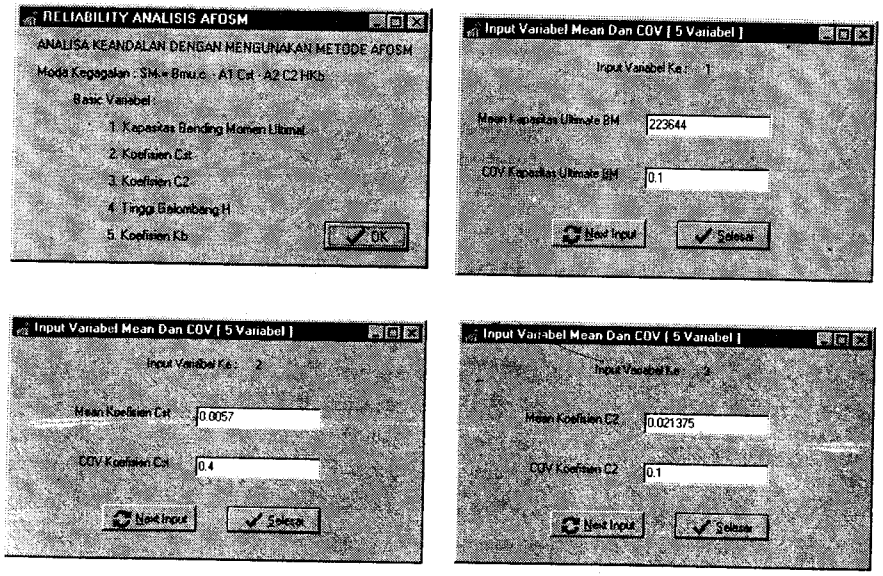
```
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  Grids, StdCtrls, Buttons;
type
  TFrmHasil = class(TForm)
  StringGrid1: TStringGrid;
    BitBtn1: TBitBtn;
    BitBtn2: TBitBtn;
    BitBtn4: TBitBtn;
    TxtEdit: TEdit:
    BitBtn5: TBitBtn;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
    procedure StringGrid1SelectCell(Sender: TObject; Col, Row: Longint;
      var CanSelect: Boolean);
    procedure BitBtn4Click(Sender: TObject);
    procedure BitBtn5Click(Sender: TObject);
    procedure BitBtn2Click(Sender: TObject);
  private
      { Private declarations }
  public
      { Public declarations }
      sbaris,skolom:longint;
  end;
var
  FrmHasil: TFrmHasil;
implementation
uses uinput;
{$R *.DFM}

procedure TFrmHasil.FormCreate(Sender: TObject);
var
  baris,kolom:byte;
begin
  with StringGrid1 do
  begin
    Cells[0,1]:='beta';
    for baris:=2 to 6 do
    begin
      Cells[0,baris]:='a'+IntToStr(baris-1);
    end;
    cells[1,0]:='terkaan awal';
  end;
end;

procedure TFrmHasil.BitBtn1Click(Sender: TObject);
begin
  Application.Terminate;
end;
procedure TFrmHasil.StringGrid1SelectCell(Sender: TObject; Col,
  Row: Longint; var CanSelect: Boolean);
begin
  if col=1 then
  begin
    TxtEdit.Text:=StringGrid1.Cells[skolom,sbaris];
    skolom:=col;
    sbaris:=row;
    TxtEdit.Setfocus;
  end;
end;

procedure TFrmHasil.BitBtn4Click(Sender: TObject);
begin
  stringgrid1.cells[skolom,sbaris]:=TxtEdit.Text;
end;

procedure TFrmHasil.BitBtn5Click(Sender: TObject);
var
  s:string;
  kolom:byte;
begin
  with stringgrid1 do
  begin
    b:=strtofloat(cells[1,1]);
    a1:=strtofloat(cells[1,2]);
    a2:=strtofloat(cells[1,3]);
    a3:=strtofloat(cells[1,4]);
    a4:=strtofloat(cells[1,5]);
    a5:=strtofloat(cells[1,6]);
  end;
  betaaksen:=0.0;
  modaaksen:=0.0;
  kolom:=1;
  screen.cursor:=crHourglass;
```

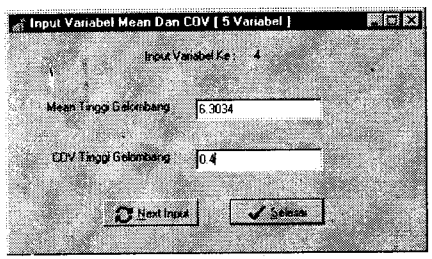
```
screen.cursor:=crHourglass;
repeat
inc(kolom);
x:=0.0;
x:=x+1;
z1:=B*a1;z2:=B*a2;z3:=B*a3;z4:=B*a4;z5:=B*a5;
betaaksen:=B;modaaksen:=moda;
a1aksen:=a1;a2aksen:=a2;a3aksen:=a3;a4aksen:=a4;a5aksen:=a5;

derivz1:=S1;
derivz2:=-K1*S2;
derivz3:=-K2*(M4*S3*M5+S3*S4*z4*M5+M4*S3*z5*S5+S3*S4*z4*z5*S5);
derivz4:=-K2*(M3*M5*S4+M5*S3*z3*S4+M3*S4*z5*S5+S3*S4*z3*z5*S5);
derivz5:=-K2*(M3*M4*S5+M3*S4*z4*S5+M4*S3*z3*S5+S3*S4*z3*z4*S5);

k:=sqrt(sqr(derivz1)+sqr(derivz2)+sqr(derivz3)+sqr(derivz4)+sqr(derivz5));

a1:=-derivz1/k;
a2:=-derivz2/k;
a3:=-derivz3/k;
a4:=-derivz4/k;
a5:=-derivz5/k;

FF:= K1*a2*S2-a1*S1;
GG:= B*B*a3*a4*a5*S3*S4*S5+B*a3*a5*S3*S5*M4+
     B*a4*a5*S4*S5*M3+a5*S5*M3*M4;
HH:= B*a3*a4*S3*S4*M5+a3*S3*M4*M5+a4*S4*M3*M5;
B:=(M1-K1*M2-K2*M3*M4*M5)/(FF+(K2*(GG+HH)));
Moda:=(m1+s1*z1)-k1*(m2+s2*z2)-k2*((m5+s5*z5)*(m3+s3*z3)*(m4+s4*z4));
with StringGrid1 do
begin
  modi:=B-betaaksen;
  str(b:8:8,s);
  cells[kolom,1]:=s;
  str(a1:8:8,s);
  cells[kolom,2]:=s;
  str(a2:8:8,s);
  cells[kolom,3]:=s;
  str(a3:8:8,s);
  cells[kolom,4]:=s;
  str(a4:8:8,s);
  cells[kolom,5]:=s;
  str(a5:8:8,s);
```

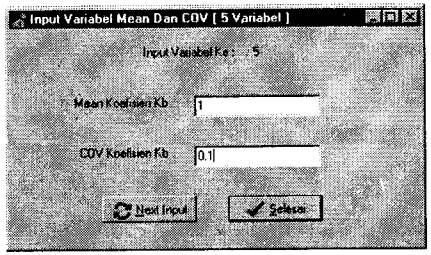


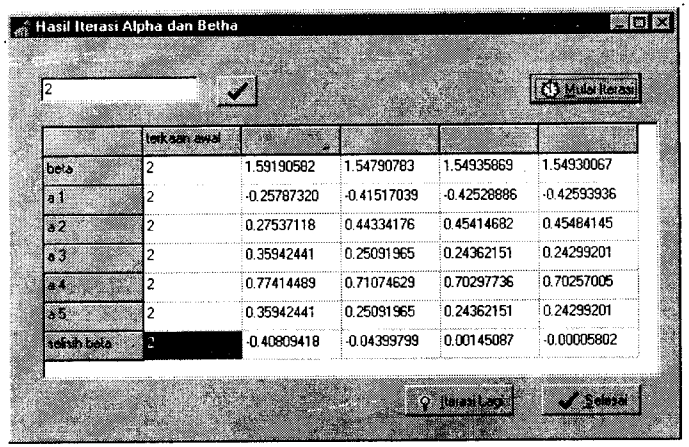
```
    cells[kolom,6]:=s;
    str(modi:8:8,s);
    cells[kolom,7]:=s;
    end;
    until abs(modi)<=0.000000001;
  screen.cursor:=CrDefault;
end;

procedure TFrmHasil.BitBtn2Click(Sender: TObject);
begin
  frmInput.Reset;
  close;
end;

end.
```

Sedangkan hasil Running program adalah sebagai berikut :









DAFTAR PUSTAKA

1. Brebbia, C.A,, and Walker, S., "*Dynamic Analysis of Offshore Structures*", Newness-Butterworths, 1979
2. Evans, J. Harvey , "*Ship Structural Design Concepts*" ; Cornell Maritime Press, Inc.; 1975
3. Hughes, Owen F. ,"*Ship Structural Design : A Rationally-based, Computer Aided, Optimization Approach*" ; John Wiley and Sons, Inc. : 1983
4. Lewis, Edward V. (editor) , "*Principles of Naval Architecture : Volume I : Stability and Strength*" ; Edisi ke-dua; the Society of Naval Architect and Marine Engineers SNAME; 1998
5. McClelland, B., and Reifel, M.D., "*Planning and Design of Fixed Offshore Platforms*", Van Nostrand Reinhold Co, 1986
6. Rosyid, D.M., "Optimasi Geometri Struktur Rangka dengan Kriteria Majemuk : Pendekatan Himpunan Fuzzy", *Majalah IPTEK*, November 1993
7. Rosyid, D.M., "Dimensional Method in Structural Optimization", *Proceedings* of the International Conference of Offshore and Polar Engineers, ISOPE'93. Singapore. 1993
8. Rosyid, D.M., "Layout Optimization of Force Transmitting Structures". Ph.D Thesis; Dept. Of Marine Technology, the University of Newcastle Upon Tyne, the U.K.; 1991.
9. Rosyid, D.M. and Budiman, A. "Probabilistic Safety Assessment of 17,500 DWT Double Hull Tanker Considering its Deck Overall Buckling failure". International Maritime Conference in Indonesia (IMCI), Jakarta, 1997.
10. Rosyid, D.M. and Setyawan, D. "Probabilistic Safety Assessment of 17,500 DWT Double Hull Tanker Considering its Ultimate Strength Failure". The First Regional Conference on Marine Technology for Sustainable Development in an Archipelago Environment (MARTEC'98), ITS, September, 1998.

11. Rosyid, D.M. and Setyawan, D. "A Monte Carlo-based Safety Assessment of 17,500 DWT Double Hull Tanker Considering its Ultimate Strength Failure". The JSPS Seminar on Marine Transportation Engineering, the University of Hasanuddin, December, 1998

12. Sen, P., "Marine Design : A Multi-Criteria Approach", *Course Notes*, Dept. Of marine Technology, Univ. Of Newcastle upon Tyne 1995.

13. Biro Klasifikasi Indonesia,"*BKI Volume II Rules For Hull Construction*" : Rules For The Classification and Construction Seagoing Steel Ship", BKI Jakarta. 1996.

BIOGRAFI SINGKAT PENGARANG

Daniel Mohammad Rosyid, lahir di Klaten 2 Juli 1961 adalah dosen Teknik Kelautan pada Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Sejak tahun 1996 menjabat sebagai ketua Program Studi Pascasarjana Teknik Kelautan ITS. Mendapatkan gelar Insinyur dari jurusan Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan ITS pada tahun 1986 dan Ph.D, dari Dept. Of Marine Technology the University of Newcastle Upon Tyne UK pada tahun 1991. Pernah bekerja di PT PAL Indonesia pada tahun 1986 - 1988 pada bagian Dept. Pengendalian Mutu Divisi Kapal Perang. Bidang spesialisasinya adalah keandalan, dan optimasi struktur, namun minatnya melebar cukup luas, dari lingkungan hidup, hingga sumberdaya manusia. Buku ini merupakan buku pertama yang ditulis bersama Dony Setyawan. Sering menulis diktat yang menunjang perkuliahan dan melakukan penelitian yang berhubungan dengan kekuatan/ optimasi bidang perkapalan maupun bangunan lepas pantai. Aktif dalam menulis makalah seminar baik nasional maupun internasional.

Dony Setyawan, lahir di Bojonegoro 20 Maret 1975 adalah dosen Teknik Perkapalan pada Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Mendapatkan gelar Sarjana Teknik jurusan Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 1998. Bidang minat dan spesialisasinya adalah konstruksi dan kekuatan struktur kapal. Buku ini merupakan buku pertama yang ditulis bersama Daniel Mohammad Rosyid. Selain itu menulis makalah seminar bersama Daniel Mohammad Rosyid.

MILIK
Badan Perpustakaan
Propinsi Jawa Timur